

Las temáticas relacionadas con el agua y el ambiente están integradas y en cada reunión que congrega a expertos y académicos se obtienen nuevas formas de análisis y propuestas variadas para el planteamiento de posibles soluciones en la gestión del recurso hídrico. Los escenarios de cambio climático que incluyan a las comunidades y, en ese sentido, que pueden manifestarse con mayor rigor en las zonas perimetrales donde las afectaciones a la salud, por cuestiones ambientales, se consideran en su punto más alto. Cuando se incluyen a las comunidades vulnerables en la búsqueda de soluciones a la contaminación de aguas servidas, se logran nuevas aplicaciones de las llamadas tecnologías limpias, que permiten minimizar el impacto producido por las actividades domésticas y que además pueden aplicarse a los procesos industriales.

El papel de la academia y el de las instituciones públicas y privadas que se propone en la Catedra del agua de la Universidad Francisco José de Caldas está dirigido a la generación de conceptos claros que le permitan entender los procesos complejos al tomador de decisiones, para generar acciones concretas que busquen la solución de los problemas actuales, lo cual genera nuevas rutas al desarrollo socioambiental y una visión proteccionista y respetuosa del medio ambiente.

Agua y ambiente

Experiencias y reflexiones frente al desarrollo sostenible y sustentable

Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby
Compiladora

UD
Editorial

ISBN 978-958-787-038-1



9 789587 870381



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



COLECCIÓN
TIERRA
Y VIDA

Agua y ambiente

Experiencias y reflexiones frente al
desarrollo sostenible y sustentable

Agua y ambiente

Experiencias y reflexiones frente al
desarrollo sostenible y sustentable

Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby

Compiladora



COLECCIÓN
**TIERRA
Y VIDA**



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UD
Editorial



COLECCIÓN
TIERRA
Y VIDA

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
© Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby, Carlos Enrique Castro Méndez, Fernando Sánchez Sánchez, Juan Carlos Alarcón-Hincapié, Helmut Espinosa García, Mario Guadalupe González Pérez, Belkis Coromoto Sulbarán Rangel, Javier Abraham Hernández Díaz, Hasbleidy Palacios Hinestroza Florentina Zurita Martínez

Primera edición, noviembre de 2018
ISBN 978-958-787-038-1

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
Nathalie De la Cuadra N.

Corrección de estilo
Editorial UD

Diagramación
Astrid Prieto Castillo

Imagen de portada
Carlos Castro
La Plata, Huila, Colombia

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 No. 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Agua y ambiente: experiencias y reflexiones frente al desarrollo sostenible y sustentable / autora compiladora Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby y otros. -- Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.

102 páginas ; 24 cm.

ISBN 978-958-787-038-1

1. Medio ambiente - Colombia 2. Recursos hídricos - Colombia 3. Hidrología - Colombia 4. Climatología - Colombia 5. Desarrollo sostenible - Colombia I. Agualimpia Dualiby, Yolima del Carmen, autora.

333.72 cd 21 ed.

A1617980

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

Prólogo	9
Capítulo 1	
Definición de las zonas morfoclimáticas de Colombia: un aporte a la correlación entre el clima ambiental y el régimen climático del suelo	13
<i>Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby</i>	
<i>Carlos Enrique Castro Méndez</i>	
Capítulo 2	
Impacto del cambio climático en el recurso hídrico del territorio colombiano	31
<i>Juan Carlos Alarcón-Hincapié</i>	
Capítulo 3	
Empleo de membranas de nanocelulosa de bagazo de agave como tecnologías sustentables	47
<i>Belkis Coromoto Sulbarán Rangel</i>	
<i>Javier Abraham Hernández Díaz</i>	
<i>Hasbleidy Palacios Hinestroza</i>	
<i>Florentina Zurita Martínez</i>	

Capítulo 4

**Fuerzas entrópicas en la frontera del sistema urbano del
área metropolitana de Guadalajara** 55

González Pérez Mario Guadalupe

Capítulo 5

**La cátedra del agua en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas:
una apuesta al trabajo en redes con las comunidades por la sostenibilidad
del recurso hídrico** 71

Helmut García Espinosa

Capítulo 6

**Los indicadores y la gestión socioambiental como instrumentos
en la construcción de política pública** 83

Fernando Sánchez Sánchez

Prólogo

Las temáticas ambientales referidas al recurso hídrico se encuentran integradas desde tiempo inmemorial, aunque la fuerza de la especialización que se ejerce en cada una de ellas haya sido semilla para la creación de enfoques disciplinares aislados que dejan a un lado las nuevas formas de interpretar las problemáticas; en este punto, se debe conjugar la interacción de diferentes formaciones académicas, científicas y de participación comunitaria que propendan a un fin común: conservación del agua y el ambiente.

A 250 años del natalicio de Francisco José de Caldas, la academia rinde homenaje al pensamiento del naturalista que demostró que las variaciones climáticas en esta parte del continente se derivan de la distribución de los pisos térmicos y que su rango de altitud podría presentar variaciones locales. Así, con la revisión de estos y otros conceptos, junto con la realización de innumerables trabajos de campo que desarrolla el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y con el apoyo académico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se abren nuevas posibilidades para avanzar en el tema de clima edáfico a escalas de mayor detalle; las decisiones y la gestión ambiental dependen de la calidad de la información cartográfica y de los temas geográficos que permiten entender los problemas ambientales que se presentan en las zonas rurales y sus efectos en las grandes ciudades.

La organización del pensamiento para analizar la variabilidad climática mediante la revisión de conceptos que rigen la determinación del clima en el contexto colombiano, y especialmente en la búsqueda de una identidad climática, permite obtener información propia de las escalas semidetallada y detallada, con la resolución suficiente para que especialistas en suelos y en ecosistemas puedan observar y predecir los cambios de uso en el territorio. Todo esto teniendo en cuenta la consideración del suelo como regulador de los procesos hídricos y el mantenimiento del caudal base de los ríos, que hacen parte de una adecuada gestión ambiental.

La organización de ideas locales debe incluir el tema de la gestión ambiental para promover el uso de tecnologías limpias que permitan reducir el impacto en los cuerpos hídricos. En el caso de México, los procesos industriales llevaron a la generación y acumulación de residuos que afectan negativamente el medio ambiente

y a los cuales es necesario darles un uso o destinación. La creación de filtros de agua biodegradables se convierte en una tecnología que beneficia a industriales que vierten las aguas residuales e impactan los ríos, pues los costos en este proceso se ven disminuidos; también podría ser útil en espacios domésticos con el beneficio de las poblaciones vulnerables que no disponen de un adecuado tratamiento de aguas para el consumo.

Cuando se habla de consumo de agua, no solo se aborda el recurso hídrico superficial, sino también las aguas subterráneas, pues estas son una de las mayores reservas de agua dulce del planeta y en algunos casos es la única fuente disponible de suministro. Por lo tanto, su uso eficiente requiere conocimiento y planificación adecuada a cada situación en particular. Una de las herramientas que permite predecir el funcionamiento de estos recursos y ayudar en el proceso de toma de decisiones es, precisamente, la modelación matemática hidrogeológica en la que un entendimiento de las leyes físicas, químicas y biológicas básicas que describen el flujo y transporte subterráneo y una descripción precisa del sistema específico de estudio permitirá una representación cuantitativa de las relaciones causa-efecto para ese sistema.

Conocer el estado de los recursos hídricos y el avance en las afectaciones de estos se hizo necesario, ya que los cambios en el estado de los ecosistemas llevaron a la creación de un sistema de información que cumpliera con los criterios establecidos para la conservación y monitoreo del medio ambiente. Esta información estaba destinada a tomadores de decisión que requerían información rápida y precisa de un fenómeno relacionado con un problema ambiental que debía resolverse dentro de los parámetros que conforman la sostenibilidad del territorio. La información generada por expertos, cuyo lenguaje resulta poco entendible a los tomadores de decisiones, se redujo mediante la integración de variables, a indicadores y finalmente a índices que facilitan la gestión ambiental en Colombia. Es necesario mostrar que hay innumerables avances en la conformación de redes que permiten la generación de un grupo de indicadores ambientales organizados por componentes y que hacen parte del sistema ambiental colombiano.

A través de la generación de escenarios de cambio climático se pueden conocer también las regiones que tendrán la mayor reducción de la oferta hídrica; esta es una información útil para la planificación local. El análisis del agua y el ambiente necesariamente debe incluir las transformaciones que hacen los seres humanos del medio y los estudios pueden ser orientados a las zonas perimetrales de los cascos urbanos. La ocupación de zonas que cumplen la función de regular las aguas de escorrentía en los denominados planos de inundación trae como consecuencias las

pérdidas económicas de la población que allí se asienta y para las autoridades locales implica ajustes en la planeación con la construcción de obras civiles, que permitan el control de las aguas en exceso. Los conflictos ambientales que se presentan en los sitios perimetrales de las ciudades pueden causar tragedias relacionadas con la salud y cuando se le analiza bajo los sistemas complejos se pueden generar cadenas de causalidad que magnifican el problema de la ausencia en la planificación de los asentamientos humanos.

En los aspectos relacionados con el fortalecimiento de las capacidades de la comunidad académica y de las poblaciones comprometidas con la sostenibilidad del recurso hídrico, se promueve la asociación de temas de gestión del agua a partir de la investigación y conformación de redes de conocimiento; a través de estas se transmiten experiencias nacionales e internacionales y se comparten en seminarios y eventos, con la participación directa de las poblaciones. La cátedra del agua que ofrece la Universidad Distrital Francisco José de Caldas tiene el apoyo de instituciones públicas y privadas que se comprometen a la difusión y comunicación de experiencias exitosas en la gestión del recurso hídrico.

Ante la identificación de los problemas por los que atraviesa la sociedad contemporánea y que directa o indirectamente afectan la calidad de vida, crecen las motivaciones para la búsqueda de nuevos senderos que permitan aplicar el desarrollo desde una óptica proteccionista y respetuosa del medio ambiente.

Capítulo 1

Definición de las zonas morfoclimáticas de Colombia: un aporte a la correlación entre el clima ambiental y el régimen climático del suelo

YOLIMA DEL CARMEN AGUALIMPIA DUALIBY*

CARLOS ENRIQUE CASTRO MÉNDEZ**

Introducción

La primera fase de la zonificación ambiental aplicada a levantamientos de suelos estuvo orientada a generar la estructura jerárquica con la cual se pudiera aplicar el esquema multiescala para sentar las bases que permitieran la correlación del clima ambiental con los regímenes de temperatura del suelo. Esto debido a que Colombia ha pasado de generar estudios de escala 1:100.000 a 1:25.000 y se requiere mejorar en alcance y aspecto científico el gradiente térmico, de manera que se procuren delimitaciones del recurso con calidad representativa y se genere información apropiada para responder solicitudes de información necesaria para el diagnóstico y el análisis del medio ambiente.

* Ingeniera Civil, doctora en Ciencias Técnicas-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. Correo electrónico: yagualimpiadualiby@gmail.com

** Magíster en Geografía, especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia. Correo electrónico: cecastro77@gmail.com

El proyecto, supervisado por la Universidad Distrital Francisco José de caldas, a través del centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC), en investigaciones desarrolladas a partir de 2010, tuvo la oportunidad de probarse durante el levantamiento de suelos que ejecutaba el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, durante el periodo 2011-2016. Durante este tiempo se verificaron y ajustaron sus planteamientos a través del reconocimiento de suelos realizado en 2.061.000 ha del territorio colombiano, la investigación durante esta primera fase presentó sus avances y se propuso su aplicación dentro del marco general para revisar las cotas de los pisos térmicos colombianos acordes con la región donde se adelantaban los trabajos de reconocimiento.

El objetivo de la presente investigación fue definir las zonas morfoclimáticas de Colombia, con la intención de revisar las cotas establecidas para los pisos térmicos aplicadas a levantamiento de suelos semidetallados y para lograr esto se siguieron los pasos que se mencionan a continuación.

- Identificar las variables fisiográficas que representan cambios en la temperatura del aire, para lo cual se consultaron estudios e investigaciones relacionadas con el tema de temperatura aplicada a clasificaciones climáticas clásicas en la literatura académica.
- Hallar coincidencias en las investigaciones. La primera es la diferencia en el gradiente de temperatura aplicado a vertientes de las cordilleras; la segunda hace referencia a regiones intracordilleranas, las cuales se caracterizaban por ser más calientes debido a la baja incidencia y acción de los vientos que refrescan el ambiente; la tercera es que la delimitación de las regiones naturales encierra características especiales de paisaje, como la altillanura colombiana, en cuyos paisajes la incidencia del sol y la intensidad del brillo solar, junto con la presencia de nubes bajas, generan condiciones diferentes a las de la Amazonia, donde se incrementan las lluvias, posiblemente por la condensación de lluvias debido a la cobertura vegetal en cuyo caso la condición térmica tiene menor fluctuación en el año.
- Delimitar las zonas de Colombia que presentan diferencias geográficas. Una vez identificado el aspecto de relieve sobresaliente, se obtuvo la delimitación de áreas representativas de un gradiente térmico, siguiendo elementos cartográficos oficiales. Para vertientes se utilizó el mapa de jerarquización de cuencas hidrográficas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam); para la delimitación de valles intracordilleranos y regiones especiales se obtuvo

información del mapa oficial de subregiones de Colombia (IGAC, 2002). Se consultaron otras cartografías de regionalización que fueron aplicadas por Pabón, Eslava y Gómez (2000).

- Generar gradientes de temperatura y encontrar la relación proporcional que hay con el régimen de temperatura del suelo para la cordillera Oriental, donde se configuran dos regímenes pluviométricos contrarios: uno monomodal en la vertiente del piedemonte llanero y la Orinoquia, y otro con orientación hacia la vertiente del Cañón del Chicamocha, lo que da origen a una distribución de lluvias tipo bimodal (Guzmán, Ruíz y Cadena, 2014). Esta característica de lugar permitiría conocer los gradientes con las mayores diferencias que pueden darse entre la temperatura del aire y la temperatura estabilizada del suelo. Otro propósito adicional fue establecer las temperaturas del suelo en vertientes altas de la montaña, debido a que no se encontraron referencias al tema asociado a la temperatura del aire en los estudios realizados en Colombia. El valor agregado fue establecer la temperatura estabilizada del suelo correspondiente a la temperatura del aire para todos los pisos térmicos registrados en Colombia y la inversión en su relación en los pisos térmicos templado y cálido.

Marco teórico

Colombia se sitúa en la franja intertropical, cuya posición geográfica difiere, en su condición climática, de los países situados en los trópicos de Cáncer y Capricornio que, por efectos del movimiento de la Tierra, presentan estaciones. El fenómeno de variabilidad climática que afecta al mundo permite la revisión de algunas variables que se creían estables para Colombia, y que para el presente se propone que sean evaluadas con nuevas hipótesis. Esto se puede verificar a través del análisis de las claves taxonómicas de suelos que emite el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA); una de ellas consideraba la identificación de los suelos tropicales como aquellos cuya diferencia de temperatura entre verano e invierno tiene variabilidad inferior a 6°C. El concepto taxonómico fue cambiado por el de régimen de humedad, debido a que posiblemente entraría en contradicción con los regímenes de temperatura del suelo definidos en levantamiento de suelos de mayor precisión, que hace parte de las familias taxonómicas acompañadas de la distribución de tamaño de partículas, la actividad de las arcillas y el tipo de mineralogía del suelo.

La distribución de los pisos térmicos, como se concibió en su momento, incluía una variación de altitud de más o menos 400 m; sin embargo, en la práctica se mantienen las mismas cotas para todo el país cuando se realizan los levantamientos de suelos; la única modificación espacial en los levantamientos de suelos corresponde al ajuste de la línea de clima a la unidad geomorfológica dominante, sin incluir esta variación en los relieves planos, donde la unidad geomorfológica se subdivide para generar dos tipos de unidades diferentes de suelos. Cuando la diferencia de altitud es de 400 m, la identificación del piso térmico puede alcanzar un área considerable, de acuerdo con el relieve que se presente, lo que genera incertidumbre en los procesos de planificación agropecuaria.

En el caso de la delimitación de los pisos térmicos y su relación con el clima ambiental del suelo —considerado como sustrato a partir del cual se establecen los ecosistemas terrestres (Ideam, IGAC, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAVH), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi) e Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), 2010)—, al definir mejor el gradiente de temperatura se obtienen límites de ecosistemas próximos a la cobertura vegetal natural. La vegetación es un componente de los organismos, en cuyo caso es el factor de formación de mayor influencia en la evolución de los suelos (Agualimpia y Castro, 2016). En esta investigación el paradigma de clima como factor activo se complementa con el de cobertura vegetal.

La temperatura del aire es el factor común utilizado para caracterizar el clima ambiental en el mundo; por tanto, se requiere revisar la representación cartográfica de este elemento en la condición ambiental colombiana para analizar su participación en el desarrollo de metodologías de clima aplicadas en el país. El trabajo de reconocimiento de suelos encierra un espacio propicio para conocer esas diferencias y plantear los cambios que deben realizarse cuando se ejecutan estudios a escala semidetallada.

Algunas de las metodologías aplicadas para clasificar el clima tuvieron su origen en zonas de latitudes altas, alejadas del contexto colombiano, y algunas de ellas fueron pensadas con fines prácticos específicos. A continuación, se hace un recuento de aquellas que se aplicaron para Colombia.

En 1802, Caldas propuso la clasificación de pisos térmicos para la zona intertropical y la dio a conocer en Ecuador (Albis y Martínez, 2000); sus planteamientos se basaron en registros de temperatura y se les asignó a los pisos térmicos la misma categoría global de regiones que se aplicaban en ese entonces (Finch y Trewartha,

1944). Caldas relacionó los pisos térmicos con las zonas o regiones climáticas globales de categorías cálidas, templadas y frías; en las zonas se realizaba la distinción según los ángulos de incidencia del sol, mientras que en climas por pisos térmicos se analizaba con base en los registros de la temperatura media anual representada en las cotas de altitud.

Koepfen en 1931 generó la clasificación climática aplicada al mundo y tuvo su objeto de estudio representado en los tipos de vegetación con especial interés en identificar los climas áridos y semiáridos (Oliver, 2005). Durante el mismo periodo, Dokutchayev (1883) se había interesado también en los efectos sucedidos al suelo cuando la evaporación es más alta que la precipitación.

En 1920, Richard Lang relacionó la precipitación media anual con la temperatura media anual y la llamó *factor lluvia* (Ideam, 2005); asimismo, determinó categorías proporcionales entre climas secos y húmedos característicos de paisajes desérticos, áridos, bosques y praderas, y de esta forma generó los rangos que representaban esos espacios geográficos.

El índice de aridez desarrollado por Martonne en 1926 se considera una modificación del índice de Lang o factor de lluvia (Ideam, 2005) y es también conocido como el índice termo-pluviométrico; este relaciona la precipitación media anual y la temperatura media anual aumentada en diez grados.

Holdridge (1979) generó el concepto de *biotemperatura* para estimar el crecimiento de las plantas en el rango de 0 a 30°C; además, consideró al valor medio anual de la biotemperatura como elemento determinante de la delimitación de zonas climáticas en el mundo. Esto permitió la masificación del catastro rural, al estructurar las zonas homogéneas de tierras a cargo del IGAC (1997). Holdridge complementó la idea de Caldas para la zona intertropical y mantuvo la equiparación de la escala global con la escala altitudinal, representada en el diagrama de formaciones vegetales del mundo, a lo cual le agregó el índice de humedad (Espinal, 1978).

Los rangos de biotemperatura representan similitud con la temperatura estabilizada en el suelo; coincidencia que es aplicada durante los levantamientos de suelos que el IGAC realiza en Colombia.

La zonificación climática que se aplica en la actualidad en los levantamientos de suelos difiere de la que producen instituciones que tienen la misión de caracterizar el clima ambiental. En este caso, la zonificación climática corresponde a los pisos térmicos modificados de Caldas, los cuales se componen de siete categorías térmicas combinadas con los índices de humedad establecidos por Holdridge (Agu-

limpia y Castro, 2016). Para escalas nacionales de humedad, los índices de Lang y de Holdridge se igualan en la clasificación climática; a escalas grandes se aplica el índice de humedad Holdridge (Etp/Prec.), en cuyo caso se determinan con mejor precisión las tierras húmedas y esto permite inferir la intensidad de los procesos evolutivos que suceden en los suelos colombianos. La temperatura y la humedad son elementos determinantes en la formación del suelo, pues en la medida que se tengan mayores categorías de clima edáfico se pueden identificar y agrupar suelos con similitud en su evolución. En esta investigación se considera que la temperatura es el elemento globalizante del clima ambiental del suelo y mediante ella se pretende el ajuste conceptual basado en el paradigma de que el régimen térmico del suelo corresponde a la interpretación directa de los pisos térmicos; es también la oportunidad para mostrar las diferencias existentes entre clasificaciones climáticas que pueden aplicarse a la delimitación de los suelos y su relación con la escala de representación.

Metodología

La metodología aplicada para definir las zonas morfoclimáticas de Colombia consistió en la revisión de documentación técnico-científica en Colombia aplicada a la identificación de áreas que por sus características fisiográficas comparten tendencias climáticas homogéneas. Con la revisión se pretendió conocer los avances en la identificación de zonas que por características relacionadas con el tiempo de exposición directa de las laderas al sol, patrones similares de dirección del viento, tendencias al ascenso o descenso de nubes, frecuencia y distribución de las lluvias y posición relativa a cuerpos de agua, variables físicas que influyen en la variación de temperatura del aire cuando se asciende 100 m y a partir de la información de temperatura media anual reportada en 685 estaciones del Ideam y otras estaciones provenientes de gremios y corporaciones autónomas, presentan gradientes diferentes y con alta correlación.

En primera instancia, se generaron las delineaciones correspondientes a través de información digitalizada a partir del modelo *srtm* de 30 m y luego se generaron nuevas zonas, hasta que la correlación entre altitud y temperatura media alcanzara una correlación aceptable.

Algunas estaciones se ajustaron en dos parámetros mínimos que consistían en ubicar la posición geográfica por ajuste de coordenadas en el municipio que se reporta en las bases de datos del Ideam y en la altitud, tomando como referencia, imágenes de satélite y el modelo digital del terreno *srtm* 30 m.

Se realizaron varias pruebas espaciales con modelos geoestadísticos y se encontró que la mejor representación cartográfica fue obtenida por regresión lineal simple, que luego fue incorporada al modelo digital del terreno para cada una de las 15 zonas morfoclimáticas (figura 1).

Figura 1. Delineación de las zonas morfoclimáticas de Colombia.



Fuente: elaboración propia.

Luego de realizar las delineaciones y ajustarlas con trabajos de campo, se realizaron los análisis de correlación entre altitud y temperatura del aire. Se utilizaron las mismas estaciones aplicadas en el análisis climático realizado para el mapa de ecosistemas, debido a que estas estaciones resultaban de normas internacionales de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). En general, fueron 685 estaciones con información de temperatura a dos metros (Ideam, IGAC, IAVH, Invemar, Sinchie IIAP, 2010).

Además, se llevó a cabo un análisis especial con datos de estaciones de la Corporación Autónoma del Valle del Cauca y se tomaron registros de la base de datos en 85 estaciones meteorológicas, de las cuales solo 15 tenían registros de temperatura del aire (IGAC, 2016b). Con la información obtenida se produjeron salidas cartográficas de la variable temperatura aplicada a dos clasificaciones climáticas: el índice de Lang y el índice de humedad de Holdridge, sin afectar esta combinación con el piso térmico propuesto por Caldas y modificado por el IGAC (2016a).

Durante las salidas de reconocimiento de suelos se realizaron controles con lecturas de la temperatura estabilizada del suelo a 50 cm de profundidad y a 120 cm bajo las coberturas vegetales dominantes. Las observaciones se georreferenciaron y se obtuvo la altitud en cada uno de esos puntos, además se tomó registro fotográfico del tipo de vegetación dominante y se consultó al dendrólogo sobre las características de la vegetación; además, se identificaron especies dominantes por pisos térmicos.

Por otro lado, se recogió información de especies identificadas durante la descripción de los perfiles de suelos, para complementar la información de reconocimiento de suelos y para ampliar el panorama de análisis del paisaje climático representado en perfiles de vegetación. Además, la información de trabajos de campo se entregó a la Corporación Valle del Cauca para ampliar los estudios de vegetación que ya tenían referenciados en el sistema ambiental (IGAC, 2016).

Durante el reconocimiento de suelos en las zonas de páramo de la cordillera oriental de Colombia se realizaron 3050 observaciones para el análisis de la relación entre la temperatura del aire a 120 cm y la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad. Las observaciones se distribuyeron en transectos y a manera de mapeo libre, acorde con la densidad de observaciones pactada para un levantamiento de suelos a escala 1:25.000.

En la figura 2 se muestra el procedimiento general aplicado para generar información de regímenes de temperatura del suelo a partir de la delimitación de las zonas morfoclimáticas.

Figura 2. Procedimiento general aplicado para conocer el régimen de temperatura del suelo a partir de la delimitación de las zonas morfoclimáticas de Colombia

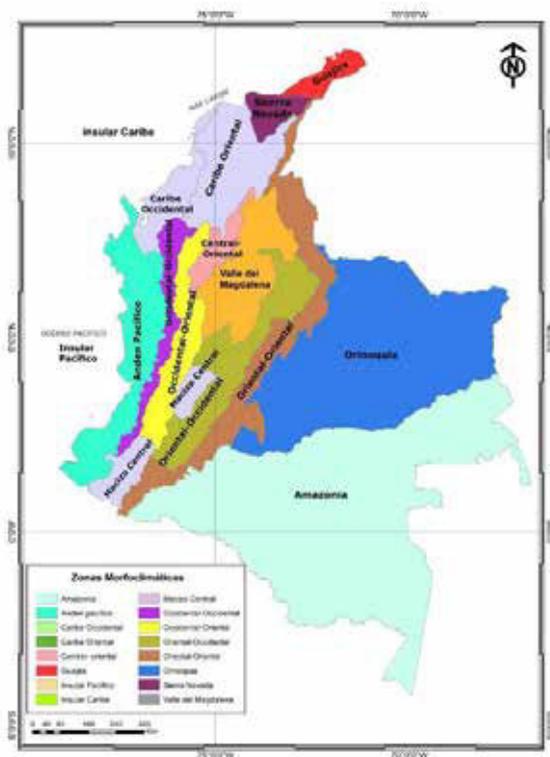


Fuente: Elaboración propia.

Resultados y análisis

En la figura 3 se presenta la identificación de las zonas morfoclimáticas de Colombia, que guardan como característica especial la distribución e intensidad similar en las lluvias, paisajes moderadamente homogéneos debido a su posición relativa, vertientes con incidencia de luz solar y regímenes de temperatura índice identificadas por investigadores como Flórez (1986); Pinzón (1989), Eslava, López y Olaya (1986), Villaseca (1995), Eslava y Flórez (1994), Poveda, Vélez y Mesa (2000), Pabón y Eslava (2001) e Ideam (2014).

Figura 3. Identificación de las zonas morfoclimáticas de Colombia



Fuente: elaboración propia.

Se realizaron el reconocimiento y los ajustes en el 50% de las zonas morfoclimáticas de Colombia de manera directa y a través de análisis de estudios en las zonas morfoclimáticas de la Guajira, la Sierra Nevada de Santa Marta, la Amazonia, zonas insulares del pacífico y el atlántico, macizo colombiano y en la vertiente oriental de la cordillera central. La tabla 1 muestra las zonas morfoclimáticas que fueron objeto de verificación y ajuste durante trabajos de campo.

Tabla 1. Áreas de comprobación de gradientes térmicos en zonas morfoclimáticas

Año	Desarrollo y pruebas	Zona morfoclimática	Municipios	Área cubierta en ha
2011	Levantamiento detallado de suelos	Valle del Magdalena	Puerto Salgar	21.638
2011	Levantamiento detallado de suelos	Vertiente occidental de la cordillera Oriental	Cota, Tabio y Tenjo	15.110
2011	Borde norte de Bogotá	Vertiente occidental de la cordillera Oriental	Bogotá, Suba	1.400
2012	Sabana de Bogotá	Vertiente occidental de la cordillera Oriental	Sopo, Tocancipá, Gachancipá, Chia, Cajicá, Facatativa, Mosquera, Funza, Madrid, Bojacá y Soacha	46.108
2013	Sabana de Bogotá	Vertiente occidental de la cordillera Oriental	Suesca, Nemocón, Cogua, Zipaquirá, Subachoque, El Rosal y Zipacón	20.000
2014	Sabana de Bogotá	Vertiente occidental de la cordillera Oriental	Levantamiento detallado de suelos escala 1:10.000 de las áreas planas de 14 municipios de la sabana de Bogotá	88.100
2014	Humedales	Caribe oriental y occidental	Fundación, Ciénaga, Pivijay, Remolino, Salamina, Calamar, Soplaviento, Gamonal, María la Baja y Cartagena	180.000
2014	Páramos	Vertiente occidental de la cordillera Oriental	21 municipios de los departamentos de Tolima, Chocó, Cauca, Nariño y Valle	96.371
2014	Páramos	Vertiente oriental y occidental de la cordillera Oriental	Levantamiento semidetallado de suelos en áreas de páramo de los municipios de Guaca, Presidente, Cerrito, Concepción y San Andrés	78.000
2014	Páramos	Macizo central	13 municipios del departamento de Nariño (Volcán chiles al volcán Azufral	53.090
2015	Política de tierras	Orinoquia	Kioscos y Tillava en Puerto Gaitán (Meta)	315.193
2015	Política de tierras	Valle del Magdalena	Aguachica, Río de Oro y Gamarra (departamento de Cesar)	119.094
2016	Política de tierras	Caribe oriental	La Paz, San Diego, Agustín Codazzi, Casacará, Astrea, Argona y la Loma (departamento de Cesar)	82.000
2016	Política de tierras	Vertiente oriental de la cordillera Oriental	Zulia, Cúcuta y Puerto Santander (norte de Santander)	45.490
2016	Cuencas priorizadas en la Corporación Valle del Cauca	Anden pacífico y vertientes oriental y occidental de la cordillera Occidental	42 municipios localizados en las cordillera Occidental y uno de ellos en el andén pacífico	905.824

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Levantamientos semidetallados de suelos (2011-2016).

En la tabla 2 se presenta la ecuación encontrada para cada unidad morfoclimática y el gradiente de temperatura hallado para cada 100 m de altitud.

La presente investigación corresponde a la actualización de nueve regresiones planteadas por Eslava y Flórez (1995), Castro (2010), IGAC (2014) y ampliadas con el estudio de nuevas regiones colombianas; como estudio especial también se incluyeron las regiones insulares del pacífico y del atlántico.

Tabla 2. Regresiones entre temperatura del aire y altitud

Número	Unidad morfoclimática	R ²	Regresiones	Gradiente térmico °C/100 m
1	Amazonia	0,73	TA = 26,727 + (-0.005* h)	-0,50
2	Orinoquia	0,83	TA = 27,425 + (-0.0052* h)	-0,96
3	Oriental-oriental	0,99	TA = 28,040 + (-0.0058* h)	-0,47
4	Oriental-occidental	0,98	TA = 29,711 + (-0.0061* h)	-0,81
5	Macizo central	0,99	TA = 30,136 + (-0.0064* h)	-0,64
6	Valle del Magdalena	0,98	TA = 28,601 + (-0.0057* h)	-0,55
7	Occidental-oriental	0,98	TA = 30,062 + (-0.0064* h)	-0,64
8	Occidental-occidental	0,78	TA = 27,541 + (-0.0055* h)	-0,61
9	Anden pacífico	0,62	TA = 27,015 + (-0.0050* h)	-0,50
10	Central-oriental	0,89	TA = 28,2387 + (-0.0016* h)	-0,52
11	Guajira	0,97	TA = 28,338 + (-0.0081* h)	-0,57
12	Sierra Nevada de Santa Marta	0,99	TA = 29,097 + (-0,0063* h)	-0,57
13	Caribe occidental	0,82	TA = 27,542 + (-0,0057* h)	-0,56
14	Caribe oriental	0,83	TA = 27,668 + (-0,0056* h)	-0,62
15	Insular	0,94	TA = 30,738 + (-0,0294* h)	0,38

*TA: temperatura ambiental.

Fuente: elaboración propia.

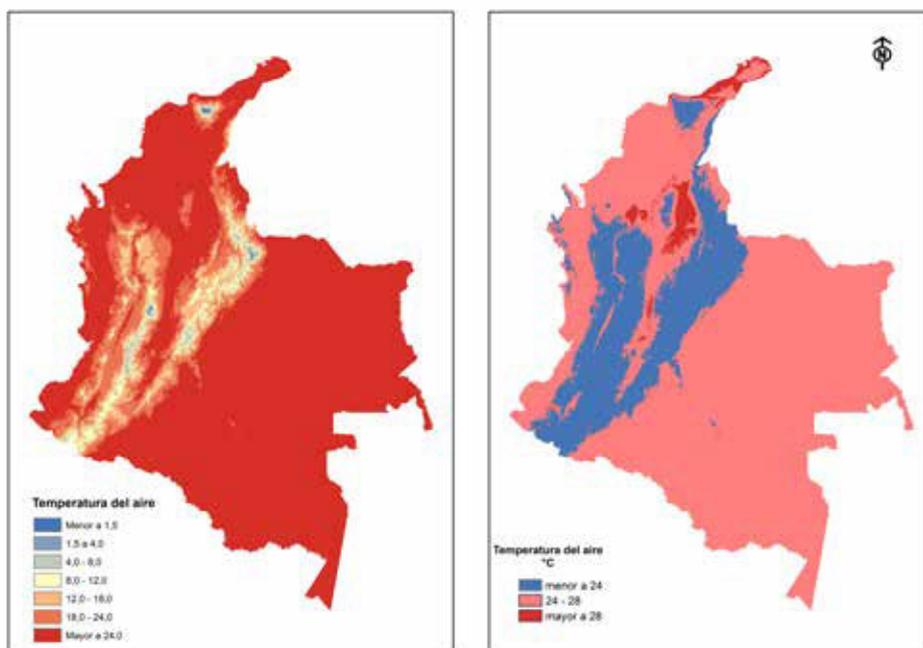
Para la región insular se contó con pocas estaciones. Los resultados de gradiente de temperatura resultaron en relación inversa, es decir, a medida que se asciende 100 metros aumenta la temperatura del aire en 0,38 °C, lo cual es un gradiente invertido y muy bajo para que haya variaciones en el interior de las regiones insulares colombianas. A partir de esto, se interpreta que las aguas costeras actúan como factor que disipa el calor; no obstante, este fenómeno debería ser estudiado con

mayor profundidad, pues no se logró verificar el gradiente de temperatura del aire y del suelo con trabajos en campo.

En los demás casos hay vertientes y regiones que disminuyen la temperatura de manera más eficiente. Es el caso, por ejemplo, de la Orinoquia y la vertiente occidental de la cordillera Oriental, cuyos fenómenos tienen efectos contrarios en pluviosidad, pues el cañón del Chicamocha es seco y la Orinoquia presenta lluvias torrenciales con periodos secos y estacionales. Las demás vertientes de montañas de las cordilleras colombianas se mantienen muy cercanas a los valores calculados por Pabón, Eslava y Gómez (2001), en un periodo relativamente reciente.

La fórmula de regresión de altitud y temperatura de aire se modeló mediante la herramienta de cálculos *raster* de Arc Gis por cada unidad morfoclimática, y se realizó la armonización y unión para configurar la primera versión de la temperatura del aire a dos metros de altitud del suelo. El resultado se muestra en la figura 4.

Figura 4. Distribución de la temperatura del aire a dos metros obtenida de las zonas morfoclimáticas de Colombia



Fuente: Agualimpia y Castro, 2016

La representación del gradiente de temperatura del aire producto de esta investigación difiere de la distribución espacial de la temperatura (IGAC, 2015) y del mapa de temperatura del Ideam (2010), porque en el primero se toma como referencia la categoría de pisos térmicos, por lo cual mantiene la relación espacial cotas y temperaturas; en el segundo su resultado es producto de una regresión, con la que se establecieron cotas fijas para cada piso térmico.

Las regresiones temperatura altitud para las zonas de páramo en la Cordillera Oriental resultantes de los trabajos de reconocimiento de suelos permitieron la complementación de valores de temperatura del aire y la correlación existente con la temperatura del suelo (Castro, Agualimpia y Sánchez, 2016).

Con el análisis de resultados de temperatura tomada en campo se identificaron las vertientes frías (umbría) y calientes (Solana). En la tabla 3 se presenta la distribución de franjas térmicas para la cordillera Oriental, desde la línea basal hasta el punto más alto situado en la vertiente oriental, en el punto conocido como Ritacuba Blanco, a 5.330 metros de altitud.

Tabla 3. Régimen de temperatura del suelo en áreas de páramo de la cordillera Oriental y cotas altitudinales ajustadas a la temperatura del aire

Piso térmico	Cordillera Oriental		Temperatura del aire °C	Temperatura del suelo °C
	Vertiente solana (occidental)	Vertiente umbría (oriental)		
	(msnm)	(msnm)		
Nival	4.460 a 5.330	4.620 a 5.330	menor a 1,5	menor 3,4
Subnival	4.070 a 4.460	4.220 a 4.620	1,5 a 4	3,4 a 5,9
Extremadamente frío	3.450 a 4.070	3.455 a 4.220	4 a 8	5,9 a 9,9
Muy frío	2,830 a 3.450	2.920 a 3.455	8 a 12	9,9 a13,9
Frío	1,880 a 2,830	1,920 a 2,920	12 a 18	13,9 a 16,1
Templado	950 a 1,880	930 a 1,920	18 a 24	16,1 a 22,1
Cálido	menor a 950	menor a 930	mayor a 24	mayor a 22,1

Fuente: Castro, Agualimpia y Sánchez (2016).

Esta investigación permitió complementar la información sobre el régimen de temperatura del suelo para los pisos térmicos muy frío, extremadamente frío, subnival y nival, en un sector representativo de Colombia, definido espacialmente por la cordillera Oriental y sus vertientes cálidas (solana) y frías (umbría), cuyas

diferencias pueden observarse en la cartografía de formaciones vegetales de Colombia (Espinal, 1978).

En la tabla 3 también se destacan las diferencias en altitud para las temperaturas mayores a 24 °C del clima cálido; 50 metros de altitud menos para la vertiente occidental que limita con el Cañón del Chicamocha y de 70 metros menos que el referenciado por el IGAC (2016) para la vertiente oriental, la cual es más húmeda y con menor fluctuación en la temperatura del aire.

Las cotas del clima frío tienen menor intervalo de altitud en la vertiente de solana (occidental), mientras que en la vertiente de umbría ese intervalo se mantiene igual al reportado por el IGAC (2014). Podría interpretarse que la vertiente caliente (solana) presenta mayor susceptibilidad al calentamiento terrestre y experimenta un estrechamiento, es decir, un descenso de los climas más fríos; además, se considera un fenómeno susceptible de monitorearse.

La temperatura del suelo para los pisos térmicos frío, muy frío, extremadamente frío, subnival y nival están 1,9 °C más alta que la del aire; esta relación se invierte en los pisos templados y cálidos.

Asimismo, se encontró un incremento promedio de la temperatura del suelo en 0,1 °C en los pisos térmicos frío, templado y cálido, que puede significar un efecto de la variabilidad climática y la aparición de un régimen de temperatura del suelo megatérmico en un sector de la Guajira, Valle del Magdalena y en el sur del Caribe.

Consideraciones finales

Según el IGAC (2015), el 84% del territorio colombiano se encuentra en piso térmico cálido; de acuerdo con el nuevo procedimiento aplicado en los diversos levantamientos de suelos a la escala semidetallada, esta extensión podría aumentar, ya que se advierte un incremento en la temperatura de los suelos. A su vez, en Colombia hay sectores cuya temperatura del aire supera los 28 °C y se constituye en regiones con regímenes de temperatura del suelo muy alta, lo que puede dar lugar a focos centrales donde se concentran los procesos de desertificación y que deberían ser tratados de manera especial para atenuar los riesgos a la desertificación en el territorio colombiano. En la actualidad, se presta especial atención a las áreas en proceso de desertificación, en lo cual se incluyen climas secos y muy secos, incluso semihúmedos, y cuyo tratamiento se aplica al borde del problema y hace parte del programa que controla el crecimiento de la desertificación y no el epicentro de las temperaturas más altas según el esquema morfoclimatológico. A manera de información, el estudio arrojó que las zonas con las temperaturas más altas

se encuentran en las áreas morfoclimáticas de la Guajira, Valle del Magdalena y en el sur del Caribe con temperatura promedio anual del aire entre 28°C y 30°C, que corresponden a 26,1°C y 28,1°C valores estabilizados de temperatura en los suelos, y es la razón por la que se plantea la inclusión de un nuevo régimen de temperatura edáfica, donde los procesos pedogenéticos se aceleran y los índices de desertificación presentan su mayor expresión.

Referencias

- Agualimpia, Y. y Castro, C. (2016). *Propuesta metodológica para la zonificación climática a diferentes escalas en Colombia, con fines de manejo sostenible del territorio. Fase I*. Bogotá: Centro de Investigaciones de la Universidad Distrital (CIUD), Grupo de investigación Programa de Gestión Ambiental en Servicios Públicos (PROGASP).
- Albis, V. y Martínez, R. (2000). Las investigaciones meteorológicas de Caldas. *Meteorología Colombiana*, (2), 131-140.
- Callejas, H y Castellanos, J. (1991). Regímenes de temperatura del suelo (actual y propuesto). *Suelos Ecuatoriales*, XXI(1), 39-50.
- Castro, C. (2010). *Instructivo para aplicar procedimientos digitales en la delimitación del clima en áreas homogéneas de tierras para catastro. Uso interno*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Castro, C y Agualimpia, Y. (2014). Gradiente de temperatura aplicado a regímenes de temperatura del suelo en páramos de la cordillera oriental. *XVII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo*. Popayán, Colombia.
- Castro, C. Agualimpia, Y., Sánchez, F. (2016). Modelo climático de los páramos de la cordillera Oriental colombiana aplicado a regímenes de temperatura del suelo. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 33-62.
- Dokuchaev, V.V. (1883). Russian Chernozem. *Selected Works of V.V. Dokuchaev*, 1, 14-419.
- Oliver, J. E. (Eds.) (2005). *Encyclopedia of World Climatology*. Netherlands, New York: Editorial Dordrecht.
- Eslava, J., López, V. y Olaya, G. (1986). Los climas de Colombia (sistema de clasificación Caldas-Lang). *Atmósfera*, (7). 41-77.
- Eslava, J. y Flórez, A. (1994). El macizo colombiano: algunas características hidroclimáticas y geomorfológicas. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, XIX(73), 265-273.

- Espinal, S. (1978). Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico escala 1:500.000. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Finch, V. y Trewartha, G. (1944). *Elements of Geography. Physical and Cultural*. Nueva York:Mc.Graw-Hill.
- Flórez, A. (1986). Relación altitudinal de la temperatura del suelo y del aire en los Andes centrales de Colombia. *Revista Colombia Geográfica*, 2, 5-36.
- Guzmán, D., Ruíz, J y Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP)*. Recuperado de <http://goo.gl/OJwfmX>
- Holdridge, L. (1979). *Ecología basada en zonas de vida*. San José de Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2005). Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá: autor.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2014). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Documentos técnicos números 9, 10 y 11. Realizar los ajustes a la evaluación de la capa de clima para su inclusión en la elaboración del mapa preliminar de ecosistemas escala 1:100.000 del área continental del país, según la fase de validación de unidades de ecosistemas y la información disponible. González, Y. Bogotá, D. C. 72 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAVH), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi) e Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico. (2010). *Ecosistemas continentales, costeros y marinos*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (1997). *Metodología para la elaboración de áreas homogéneas con fines catastrales*. Bogotá: Ministerio de Hacienda y Crédito Público.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2002). *Atlas de Colombia*. (5ta. Ed.). Bogotá: autor.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Instructivo zonificación climática*. Bogotá: autor.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. Bogotá: autor.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2016). *Metodología elaborar y actualizar áreas homogéneas de tierras con fines multipropósito*. Bogotá: autor.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Actualización digital de áreas homogéneas de tierras con fines catastrales*. Bogotá: autor.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2016). *Levantamiento semidetallado de suelos escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC*. Bogotá: autor.
- Jiménez, L. y Flórez, A. (1993). Modelo de correlación altitudinal entre la temperatura estabilizada del suelo y la temperatura del aire. *ZENIT*, (4), 13-22.
- Köeppen, W. (1931). *Climatología. Con estudio de los climas de la tierra*. México, D. F. y Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Pabón, J. Eslava, J. y Gómez, R. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación. *Meteorología Colombiana*, (4), 47-59.
- Pinzón, A. (1989). Temperatura edáfica del páramo de Sumapaz. *Suelos Ecuatoriales*, 19(1), 31-40.
- Poveda, G., Vélez, J., y Mesa, O. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. Medellín: Universidad nacional de Colombia.
- Pulido, C y Garzón C. (1987). Contribución al conocimiento de los regímenes de temperatura en Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, XVII(2), 106-112.
- Villaseca, S. (1995). La temperatura del Suelo. *Agricultura Técnica*, 50(2), 155-160

Capítulo 2

Impacto del cambio climático en el recurso hídrico del territorio colombiano

JUAN CARLOS ALARCÓN-HINCAPIÉ*

Introducción

Como se ha previsto por la comunidad científica las alteraciones originadas por el cambio climático impactarán las diferentes regiones del mundo (El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, [IPCC], 2007). Este cambio modificará las distribuciones espaciales en los componentes fisicobiótico y socioeconómico, lo que producirá conflictos tanto en la relación sociedad naturaleza, como en cada uno de estos componentes. En efecto, el cambio climático expresado en la modificación de la temperatura media, la precipitación anual, la humedad relativa y la escorrentía posibilitarán transformaciones para el ciclo hidrológico y, por ende, se hará más compleja la planificación de los recursos hídricos. Por lo tanto, el cambio climático tendrá efectos importantes sobre los recursos de agua a escala regional (Menzel y Burger, 2002; Muzik, 2002), por lo que resulta fundamental llevar a cabo un adecuado manejo, y una gestión y planificación de este. La necesidad de incorporar los recursos de agua, dentro de los modelos de evaluación global y regional, para determinar los impactos del cambio global, constituye en la actualidad un aspecto de gran importancia. Existen modelos hidrológicos que permiten estimar los valores de escorrentía actual a escala de grandes extensiones, a partir de las

* Doctor en Geografía. Docente investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Correo electrónico: jcalarconh@udistrital.edu.co

variables precipitación y temperatura simuladas por los modelos regionales de clima (MRC). Entre estos podemos mencionar el modelo de Yates (1997), WBM (Water Balance Model) de Vörösmarty, Federer y Schloss (1998), WaterGAP (Water-Global Assessment and Prognosis) de Döll, Kaspar, Alcamo (1999) y SIMPA (Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación) de Estrela y Quintas, (1998).

Por otro lado, se han planteado modelos de balances hídricos mensuales a nivel de escala macro y semi-distribuido, que han sido desarrollados para simular y predecir los procesos hidrológicos utilizando herramientas de Información Geográfica (Shenglian, Jinxing, Lihua y Dingfang, 2002). Se han llevado a cabo varios estudios relacionados con la gestión de los recursos hídricos debido al déficit de agua en las diferentes regiones (Yangge, Cheng, Song., 2008). El concepto fundamental de la propuesta de modelos de gestión del agua en diferentes cuencas ha sido desarrollado teniendo en cuenta la visión general de modelos hidrológicos utilizando el Modelo Hidrológico Geomorfología base (GBHM) y a través del uso de sistemas de información geográfica (SIG) (Pachiri, Mitani y Ikemi, 2013) otros estudios relacionan los efectos del cambio climático sobre el balance hidrológico (Yanzhao, Feng, Qing Huang y Lin, 2008). Asimismo, otras investigaciones plantean los aspectos económicos de la adaptación al cambio climático (Agrawala y Frankhauser, 2008).

El cambio climático, atendiendo a sus causas y consecuencias, representa uno de los mayores desafíos que deberá enfrentar la humanidad durante este siglo, con diferencias entre países, debido a los impactos negativos en las regiones que son significativos, en especial los del sector agrícola, la salud de la población, la disponibilidad de agua, el turismo, la infraestructura urbana y la biodiversidad y los ecosistemas, entre otros (Magrin, Gay García, Cruz Choque, Giménez, Moreno, Nagy, Nobre y Villamizar, 2007). Los efectos se podrían intensificar en el futuro en caso de que no se lleven a cabo —a escala regional y global— las acciones necesarias para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y no se instrumenten las medidas e inversiones correspondientes para la adaptación a las nuevas condiciones climáticas.

Las simulaciones del clima futuro según el IPCC (2007) se han efectuado con base en escenarios socioeconómicos diseñados previamente que caracterizan las posibles variaciones futuras en la concentración de gases de efecto invernadero, debido a cambios tanto en la sociedad (aumento disminución de la población mundial), como en la economía y en las fuentes de energía. Estos escenarios pueden dividirse en dos grandes grupos: A y B (Saurral y Camilloni, 2011).

Los escenarios A son aquellos que suponen un futuro caracterizado por un rápido crecimiento económico mundial y son los asociados a los aumentos más

marcados en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, debido a que las mejoras económicas se darían en base al empleo de fuentes de energía contaminantes. Los escenarios B suponen un mundo más ecológico, lo que determina una concentración menor de esos gases. El incremento de gases de efecto invernadero aumenta la magnitud del forzante radiactivo al cerrar parte de la ventana atmosférica (a través de la cual la radiación de onda larga emitida por la Tierra se escapa al espacio exterior) y esto da lugar a un calentamiento de la superficie terrestre. De este modo, los escenarios A son los que simulan los aumentos más marcados en la temperatura media global, mientras que los B prevén cambios más moderados (Solomon, Qin, Manning, Alley, Bernsten *et al.*, 2007). La posibilidad de contar con escenarios climáticos futuros es de gran utilidad para poder hacer inferencias sobre cambios en una gran cantidad de variables, desde las relacionadas con las actividades agrícola-ganaderas hasta aquellas asociadas con la variabilidad hídrica y el riesgo de eventos extremos de temperatura y precipitación (Saurral y Camilloni, 2011).

Metodología

El estudio se realizó en dos fases: 1) la modelación espacial actual de la oferta hídrica natural disponible y de sus indicadores asociados en Colombia con una base climática 1971-2000, y 2) la elaboración de mapas de las posibles distribuciones futuras de la oferta hídrica natural disponible, considerando los periodos 2011-2040 y 2070-2100, desde los escenarios de cambio climático A2 y B2 por IPCC (2007).

La modelación espacial actual régimen hídrico (índice de aridez) y de la oferta hídrica superficial (escorrentía) para Colombia

La caracterización y la estimación de la oferta hídrica superficial se soportan en los procesos del ciclo del agua y en la cuantificación de sus componentes a partir del balance hídrico, en particular el de escorrentía y su expresión en términos de rendimiento hídrico.

Ciclo hidrológico

Según Unesco (2010), se define como la

Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y re-evaporación. (p. 178)

Los componentes del ciclo hidrológico que se relacionan más directamente con la disponibilidad de agua y que intervienen en la ecuación del balance hídrico son la precipitación como variable de entrada, la evapotranspiración real y la escorrentía como variables de salida.

La precipitación es el volumen de agua que cae por acción de la gravedad sobre la superficie terrestre con forma de lluvia, llovizna, nieve o granizo procedentes de la condensación del vapor de agua (Estudio Nacional del Agua [ENA], 2010). La precipitación es la responsable del depósito de agua dulce en el planeta y, por ende, de la vida de animales y de vegetales, que necesitan agua para vivir. La evapotranspiración real (ETR), sinónimo de evapotranspiración efectiva, se define como la suma de las cantidades de agua evaporadas del suelo y de las plantas cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad. Se diferencia de la evapotranspiración potencial (ETP), que es la cantidad máxima de agua capaz de ser evaporada en una condición climática determinada, con una cubierta vegetal continua y suficiente disponibilidad de agua. Por lo tanto, incluye la evaporación del suelo y la transpiración vegetal en una región específica y en un intervalo dado; se expresa en unidades de lámina de agua (Unesco, 2010). La escorrentía hídrica superficial (ESC), o flujo superficial, se define como parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo y se concentra en los cauces y cuerpos de agua. Es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. En el balance hídrico se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración en suelo; está en función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca, y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca (ENA, 2010).

Todo lo anterior influye en la estimación de la distribución espacial de la oferta hídrica para el periodo de referencia (1970-2000), que se modeló utilizando los indicadores hidrológicos ambientales balance hídrico e índice de escasez.

Balance hídrico

El balance hídrico se basa en la ley física de conservación de masas y, según la Unesco (2010), es definido como “Balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua” (p. 178). La formulación matemática del balance, por lo tanto, expresa la igualdad entre los aportes de agua que entran a un sistema hidrográfico determinado y la cantidad de agua que sale del sistema, considerando

las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante el tiempo determinado.

$$ESC = P - ETR$$

ESC: escorrentía hídrica superficial (mm); P: precipitación (mm); ETR: evapotranspiración real (mm).

Calculado así:

$$ETR = P / (0.9 + (P^2 / L^2))^{0.5}$$

$$L = 300 + 25 * T + 0.005 T^3$$

ETR: evapotranspiración real (mm) según Turc (1955); ETP: evapotranspiración potencial (mm); P: precipitación (mm); L: factor heliotérmico; T: temperatura (°C).

La ecuación anterior permite la interpretación y el análisis de los principales componentes mencionados, para establecer la oferta hídrica y caracterizar las condiciones del régimen hídrico en las diferentes zonas hidrográficas del país.

Índice de aridez

El índice de aridez es otro indicador del régimen natural que permite analizar el régimen hídrico, y ha sido definido como una característica del clima que muestra, de manera cualitativa, los lugares con excedentes y déficit de agua. La evapotranspiración potencial representa, para este caso, un factor determinante en la obtención de este índice. Para generar el indicador, se utilizan las ecuaciones de Turc para el cálculo de la ETR y Thornthwaite ajustada por brillo solar (latitud), para el cálculo de la ETP. Este índice representa la dinámica superficial del suelo determinada a partir de las variables de ETP y de ETR, y no se refiere a la dinámica subsuperficial del suelo, utilizada en análisis climáticos para clasificar el grado de humedad del suelo a través de la relación de la precipitación y la evapotranspiración potencial. Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Ia = (ETP_{ajustada} - ETR) / ETP_{ajustada}$$

Ia: índice de aridez (adimensional); ETP_{ajustada}: evapotranspiración potencial ajustada por brillo solar (mm); ETR: evapotranspiración real (mm). Este índice representa la dinámica superficial del suelo a partir de las variables de ETP y de ETR y no se refiere a la dinámica subsuperficial del suelo, utilizada en análisis climáticos para clasificar el grado de humedad del suelo a través de la relación de la precipitación y la evapotranspiración potencial.

Calculado así:

$$ETP = 12 * 16 * (10 * T / I)^a$$

$$I = ((T / 5)^{1.514}) * 12$$

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.0000771 * I^2 + 0.0179 * I + 0.49239$$

I: coeficiente anual; T: temperatura promedio anual; a: coeficiente en la fórmula de Thornwaite

Para este estudio la ETP se ajustó por brillo solar (latitud) a partir de la siguiente ecuación:

$$ETP_{ajustada} = ETP * 1.02147$$

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, por sus siglas en inglés), las que generaron datos de temperatura media anual para pixeles cada 900 metros (Alarcón y Pabón, 2013).

Con Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW) o distancia inversa ponderada, se interpolaron los datos de temperatura media anual observados y los generados con el DEM para obtener datos para pixeles de 900 metros (cerca de 1.500.000 puntos para el territorio colombiano). Una vez evaluados los diferentes métodos de interpolación disponibles, el que mejores resultados entregó fue IDW, debido a que el muestreo fue lo suficientemente denso en relación con la variación que se estaba estudiando: 1.400.000 puntos aproximadamente.

La precipitación se obtuvo utilizando los datos de estaciones climatológicas suministradas por el Ideam, complementadas a partir de las bases de datos de la Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM); se obtuvo así un total de 3700 puntos con datos de precipitación anual. A partir de estos datos, con interpolación (con IDW), se generaron otros para una cuadrícula de 900x900 metros.

La modelación espacial futura del régimen hídrico y de la oferta hídrica superficial para Colombia

La estimación de la oferta hídrica superficial futura, a partir del balance hídrico, en particular el de escorrentía y el índice de aridez, se simularon mediante la incorporación al modelo 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 y la precipitación anual en esos escenarios se interpoló utilizando IDW para generar información a mayor resolución espacial (900m) y disponer de datos para todo el territorio nacional y estandarizar la información del periodo 1971-2000.

Resultados y análisis

¿Temperatura, precipitación 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 para la capa de precipitación fueron entre 242 mm y 14665 mm, en la Guajira y el sector norte del departamento del Cauca, respectivamente. El mapa de temperatura media anual del aire es el resultado de la unión espacial de cada región climática; así el análisis consideró de manera fidedigna 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 del Tolima y Huila, y de la Guajira y Norte de Santander, los valores extremos se presentan en el Pacífico y sur del país con valores entre el 85 % y 95 %; el resto del país se caracteriza por humedades relativas ente el 75 % y el 85 % (Alarcón y Pabón, 2013).

La estimación del régimen hídrico y de la oferta hídrica superficial actual para Colombia: escorrentía

El régimen hidrológico del país se caracteriza por tener una escorrentía promedio de 1644 mm, con valores que van desde una escorrentía promedio de 100 mm al año en la península de la Guajira, hasta escorrentías mayores de 6000 milímetros en el Pacífico. En el Caribe, con excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta y el sector norte del departamento de Antioquia en la cuenca del río Atrato, se presentan valores con escorrentías bajas, sin superar los 400 mm; mientras que regiones como el Pacífico, en particular el sur del departamento del Choco y occidente de los departamentos del Cauca y Valle del Cauca, específicamente en la cuenca alta del río San Juan, se presentan escorrentías muy altas, mayores de 5000 mm.

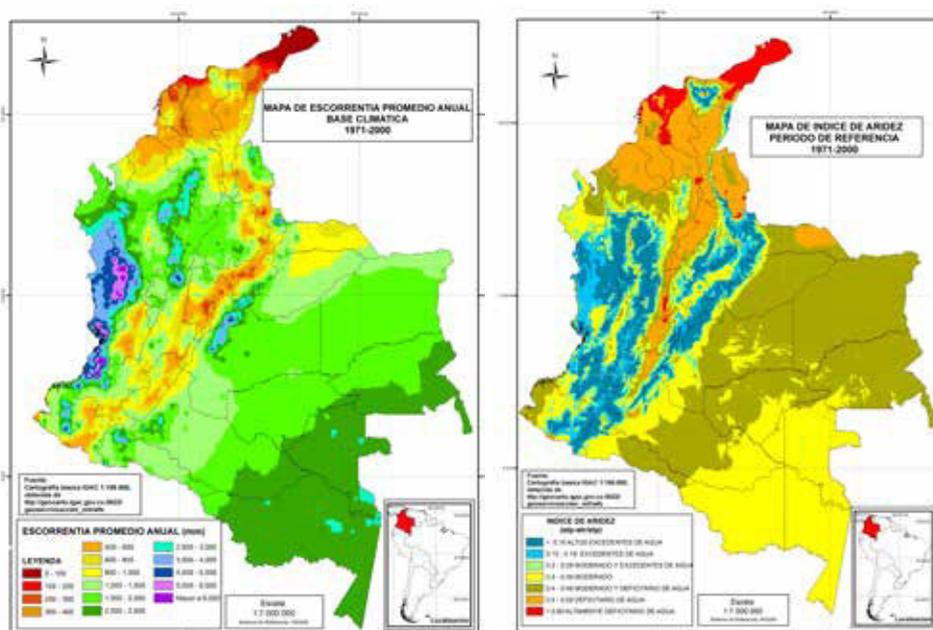
En la figura 1 se muestran valores bajos de escorrentía en los altiplanos cundiboyacenses y nariñense en el departamento del Valle del Cauca; en la cuenca alta del río Patía, en el desierto de la Tatacoa, en el Huila; en el cañón de la cuenca del río

Chicamocha y la cuenca alta del Catatumbo en Santander y Norte de Santander. Sin embargo, para el resto de la región andina, la escorrentía se considera moderada, con valores entre 1500 mm y 2500 mm, lo que cubre el 31 % del territorio nacional. El piedemonte llanero se caracteriza por tener una escorrentía media alta, con valores mayores de 2000 mm. En los departamentos del Arauca y Casanare se presentan valores medios de escorrentía hasta con 1000 mm. En general, la Amazonia colombiana presenta escorrentías que van desde los 1000 mm hasta los 3000 mm.

Índice de aridez

Las características del régimen hidrológico están determinadas por factores climatológicos y bióticos, asociados con la cobertura de la superficie terrestre y los propios de la dinámica del agua en el suelo y subsuelo (ENA, 2010). En esta investigación se utilizó como indicador para estudiar el régimen hidrológico el índice de aridez, cuyo valor promedio para esta investigación es de 0,23, lo que deja a Colombia en condiciones moderadas y excedentes de agua; a su vez, presenta sectores altamente deficitarios de agua localizados en la península de la Guajira y norte de los departamentos de Magdalena y Atlántico, así como en los límites de los departamentos de Cundinamarca y Tolima y sur del departamento de Norte de Santander. Las zonas deficitarias de agua ocupan un 6,9% del territorio colombiano y se localizan en la cuenca del río grande del Magdalena, norte del departamento de Córdoba, Sucre, Magdalena, Cesar y parte del departamento de Norte de Santander. Las condiciones moderadas a deficitarias de agua se dan en la sabana de Bogotá, y en el valle del río Chicamocha; también en la Orinoquia y Amazonia colombiana. Es importante mencionar que un porcentaje muy alto (48,5%) del país presenta excedentes de agua superficial, de moderados a altos; asimismo, que cerca del 80 % de la población y actividades económicas del país están localizadas en cuencas con déficit natural de agua (figura 2)

Figura 2. Mapa de escorrentía promedio anual (izquierda) e índice de aridez (derecha), periodo de referencia 1971-2000



Fuente: elaboración propia.

Mapas de escorrentía futura

Al ejecutar el modelo para evaluar la distribución potencial de la escorrentía para los escenarios de cambio climático propuestos, se generaron cuatro mapas con los dos indicadores para los dos periodos analizados y desde los escenarios de cambio climático A2 y B2 (figura 3)

Se observa que el comportamiento de las nuevas áreas varía en función del escenario utilizado, lo que genera valores promedios de escorrentía así:

Tabla 1. Escorrentía promedio según escenario

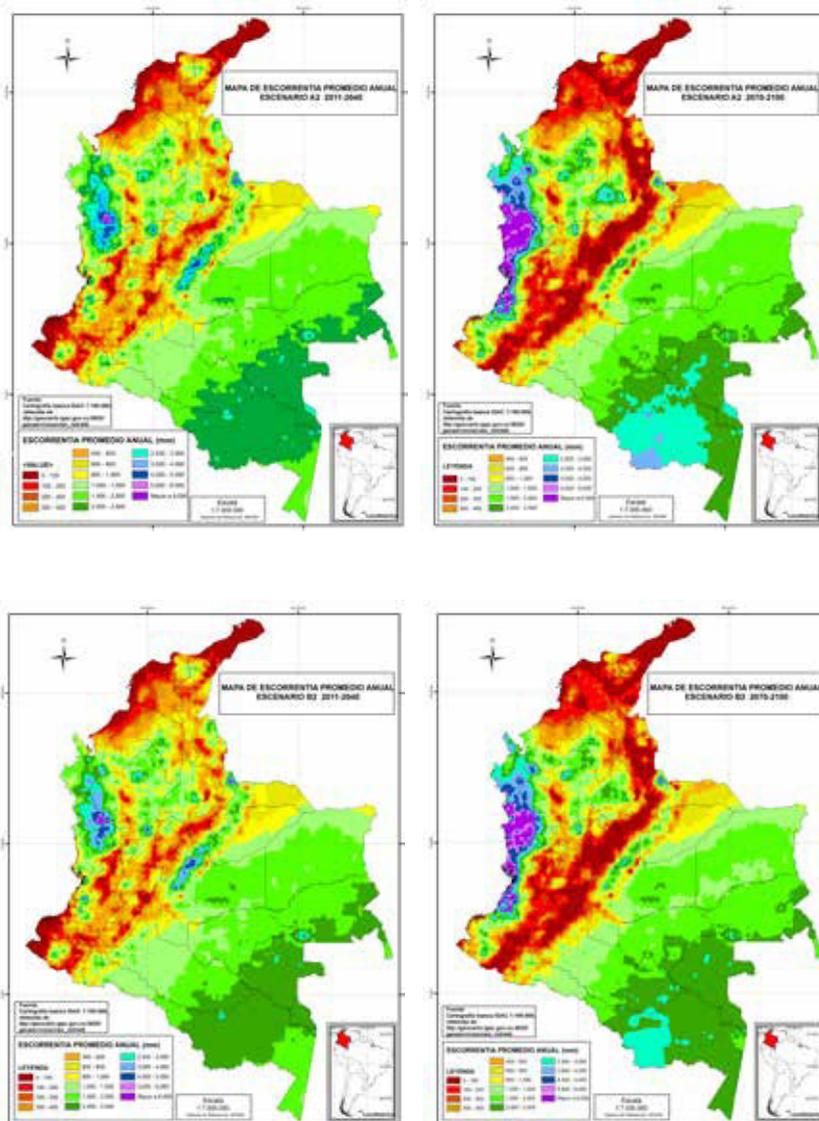
Escorrentía (mm)	A2 2011-2040	B2 2011-2040	A2 2070-2100	B2 2070-2100
	1344	1339	1471	1396

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 1 se pueden observar reducciones significativas en el volumen de escorrentía con relación al valor actual, en un 16 % en promedio para todos los escenarios. La menor reducción se da en el escenario A2 para finales de siglo, con un 11 % de la escorrentía actual, y la reducción más drástica se da en el escenario B2 para mediados de siglo hasta en un 19 % respecto a la actualidad.

En la figura 3 se observa que los escenarios A2 y B2 para mediados de siglo, en la modelación, estiman valores de escorrentía muy similares con promedios muy bajos (100 mm) en el litoral norte, a excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta, así como en el departamento de Nariño, un núcleo en el Valle del Cauca, en el departamento del Huila, límites entre Tolima y Cundinamarca y el departamento de Boyacá. Otro núcleo bajo de escorrentía se presenta en los departamentos de Arauca y Casanare. Se dan valores hasta 600 mm en gran parte de la cuenca Magdalena-Cauca, excluyendo sectores de Antioquia y Santander con valores de escorrentía que van hasta los 3000 mm de escorrentía. Los valores muy altos de escorrentía se observan en el Choco y algunos sectores del piedemonte llanero, la Amazonia y la Orinoquia, con valores entre los 1000 mm y los 2500 mm de escorrentía. Para finales, de siglo el escenario más fuerte es el A2, que acentúa los promedios bajos de escorrentía principalmente para los departamentos de Nariño, Huila, Cauca, el Valle del Magdalena Cauca, casi el 90 % del departamento de Cundinamarca y Boyacá, la cuenca del río Chicamocha, norte de Santander. Por su parte, la Guajira sigue su condición de muy baja escorrentía, pero incrementando su superficie a regiones circundantes de la Sierra Nevada de Santa Marta. Otro aspecto importante por mencionar es que la modelación sugiere aumentos considerables de las regiones con escorrentía superior a los 6000 mm, localizándose principalmente en el sur del departamento del Choco y norte del Valle del Cauca. En general, la Amazonia y la Orinoquia presentarían cierta estabilidad en los escenarios modelados, con valores promedio entre los 1000 mm y los 3000 mm.

Figura 3. Distribución potencial de la escorrentía bajo los escenarios A2 (arriba) y B2 (abajo) periodos 2011-2040 y 2070-2100



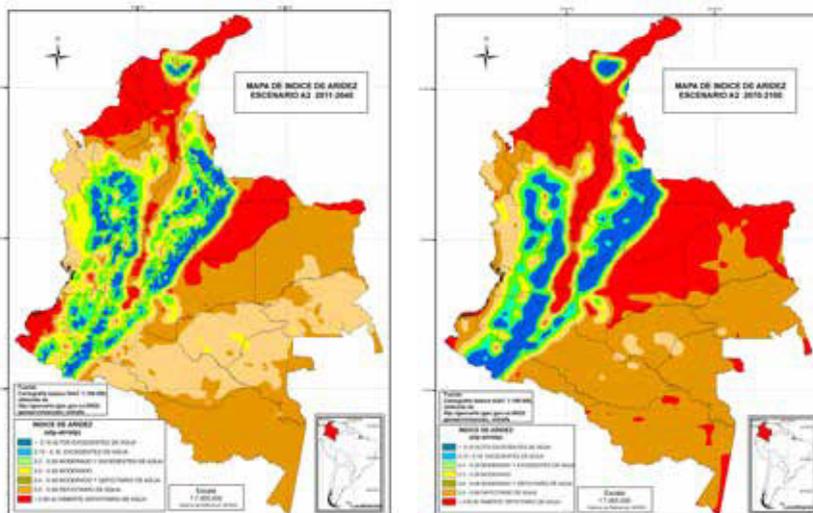
Fuente: elaboración propia.

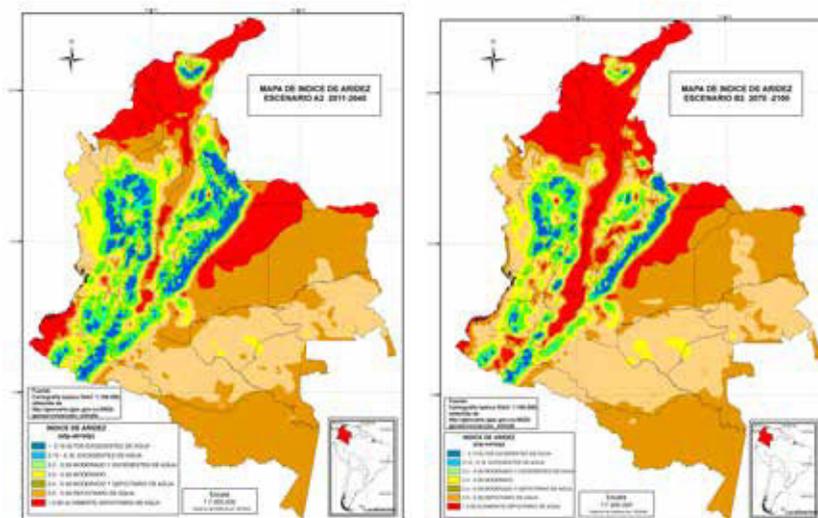
Mapas de índice de aridez futuro

Al modelar el índice de aridez para los escenarios A2 y B2, se sugiere que el más fuerte es el A2 para finales de siglo, pues pone al país con un valor promedio de 0,50, lo que significa una situación deficitaria de agua, mientras que A2 para mediados de siglo y B2 en general pondrían al país en una condición moderada y deficitaria de agua, como se aprecia en la figura 4. La modelación para mediados de siglo en los dos escenarios es similar; se destacan las regiones altamente deficitarias de agua, que en promedio ocuparían un 15 % del territorio nacional, localizándose en el valle del Magdalena y el sector occidental del departamento de Nariño y los departamentos de Arauca y Casanare y en la costa norte colombiana a excepción de la Sierra Nevada. La zona andina presentaría altos y moderados excedentes de agua, en el norte de la región pacífica se presentarían condiciones moderadas a deficitarias de agua, y la Amazonia y la Orinoquia en general cambiarían su condición a deficitaria de agua.

El escenario A2 para finales de siglo incrementaría las superficies altamente deficitarias de agua hasta en un 29,8 % del territorio nacional, y un 41 % del país estaría en una situación deficitaria de agua; esta zona se localiza en el Valle del Magdalena, el litoral Caribe y gran parte de la Orinoquia (ver figura 4). La zona andina en promedio tendría una condición de excesos de agua, con un 11,9 % de la superficie del país; la amazonia y el pacífico según el escenario presentarían déficit de agua.

Figura 4. Distribución potencial del Índice de Aridez bajo los escenarios A2 (arriba) y B2 (abajo) periodos 2011-2040 y 2070-2100





Fuente: elaboración propia.

Consideraciones finales

El país ha producido múltiples estudios que han permitido mejorar el conocimiento de sus recursos hídricos y los posibles impactos que sobre ellos podría traer el cambio climático; son estudios que han mejorado significativamente con relación al alcance y al nivel de detalle. De la misma manera, se hace necesaria la producción de información más regional detallada y veraz para apoyar los procesos de toma de decisiones sobre el recurso hídrico del país. Así, la presente investigación suministra información con alto nivel de detalle acerca de las posibles modificaciones o alteraciones que, según los modelos utilizados, sufriría el recurso hídrico del país.

Los resultados encontrados con los dos escenarios usados (A2 y B2) concuerdan en gran medida con las tendencias planetarias esperadas: Colombia es un país altamente vulnerable a los posibles impactos del cambio climático y el régimen hidrológico del país se podría ver altamente afectado en términos de escorrentía promedio hasta en un 11 % de la actual, la reducción más drástica se podría dar en el escenario B2 para mediados de siglo, hasta en un 19% respecto a la actualidad.

Con relación a las condiciones de aridez, según esta modelación el país pasaría de una índice de aridez moderada y con excedentes de agua a una condición deficitaria de agua para el escenario A2 a finales de siglo, siendo este el más agresivo. Los otros escenarios dejarían al país en una condición moderada a deficitaria de agua,

siendo de todas maneras una condición desfavorable respecto a los promedios actuales, como se puede ver en la tabla 1. Los territorios con moderados, excedentes y altos excedentes de agua en los escenarios modelados tienden a la baja, mientras que las áreas con condiciones moderadas, deficitarias y altamente deficitarias de agua tienden a incrementarse en todo el territorio colombiano, situación muy compleja, debido a la estrecha relación entre los recursos hídricos y las actividades socioeconómicas del país.

Las áreas altamente deficitarias de agua se incrementarían considerablemente, y se ubicarían, en especial, en la Costa Caribe, el valle del río Magdalena y la Orinoquía colombiana; asimismo, los territorios con altos excedentes de agua tienden a reducirse notoriamente, con lo cual pasan a ser territorios moderados y deficitarios de agua.

Tabla 1. Índices de aridez futuros bajos los escenarios A2 y B2

Zona	Actual	A2 2011-2040	B2 2011-2040	A2 2070-2100	B2 2070-2100
Altos excedentes de agua	21,6%	5,9%	2,7%	8,8%	2,7%
Excedentes de agua	20,2%	2,8%	1,6%	3,1%	1,6%
Moderado y excedentes de agua	27,1%	8,3%	5,4%	5,7%	5,4%
Moderado	11,3%	8,9%	8,1%	4,7%	8,1%
Moderado y deficitario de agua	10,1%	26,0%	30,3%	7,0%	30,3%
Deficitario de agua	6,9%	33,3%	32,8%	41,0%	32,8%
Altamente deficitario de agua	2,9%	14,8%	19,1%	29,8%	19,1%

Fuente: elaboración propia.

Los resultados encontrados en esta investigación sugieren que el cambio climático podría generar efectos negativos sobre los recursos hídricos en el territorio nacional; así, la cuantificación espacio temporal de dichos impactos será de vital importancia en aras de generar políticas que permitan dar respuestas inmediatas a las posibles afectaciones del recurso, asociadas con este cambio, y deben servir de base para una correcta gestión y uso del agua, y una ocupación del territorio con una visión de largo plazo; en síntesis, planificar el recuso agua es parte de los retos que genera el cambio climático.

Referencias

- Agrawala, S. y Fankhauser S. (Eds.) (2008). *Economic aspects of adaptation to climate change. Costs, benefits and policy instruments*. París: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).
- Alarcón, J. y Pabón, J. (2013). Cambio climático y formaciones vegetales. *Colombia Forestal*, 16(2), 171-185. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/4719/6984>
- Döll, P., Kaspar, F. y Alcamo, J. (1999). Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage basins. *Mathematische Geologie*, (4), 111-118.
- Estrela, T. y Quintas, L., 1996. El sistema integrado de modelización precipitación escorrentía (SIMPA). *Revista de Ingeniería Civil*, (104), 43-52.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: autor.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2007). Cambio Climático 2007. Informe de síntesis. Ginebra, Suiza. Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
- Magrin, G., Gay García, C., Cruz Choque, D., Giménez, J. C., Moreno, A. R., Nagy, G. Nobre, J. C. y Villamizar, A. (2007). Latin America. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Recuperado de https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm
- Menzel, L. y Burger, G. (2002). Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology*, 267(1), 53-64.
- Muzik, I. (2002). A first-order analysis of the climate change effect on the flood frequencies in a sub-alpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 267, 65-73.
- Pabón, J.D. (2008). *Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe entregado a Ideam*. Bogotá: Departamento de Geografía Universidad Nacional de Colombia.
- Pabón, J. D. (2012). *Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe entregado a Ideam*. Bogotá: Departamento de Geografía Universidad Nacional de Colombia.

- Pachri, H., Mitani, Y. y Ikemi, H. (2013). Development of Water Management Modeling by using GIS in Chirchik River Basin, Uzbekistan. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 169-176.
- Turc, L. (1955). Le bilan d'eau des sols. Relation entre la precipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, (5), 491-569.
- Unesco. (2010). *Glosario hidrológico internacional*. Recuperado de <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDES.HTM>.
- Yates, D.N. (1997). Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, 201, 289-310.
- Saurral, R. I. y Camilloni, I. (2011). *La hidrología superficial de la cuenca del Plata y su representación a través de simulaciones climáticas: identificación de errores y mecanismos físicos asociados*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Shenglian, G., Jinxing, W., Lihua, X. y Dingfang, L. (2002). A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts. *China Journal of Hydrology*, 268(1-4), 1-15.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. et al. (2007). Technical Summary. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge. New York: Cambridge University Press,
- Vörösmarty, C.J., Federer, C.A. y Schloss, A. (1998). Potential evaporation functions compared on US watersheds: implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology*, 207, 147-169.
- Yangge, T. Cheng, W. y Song, H. (2008). Global scientific production on GIS research by bibliometric analysis from 1997 to 2006. *Journal of Informetrics*, 2(1), 65-74
- Yanzhao, Y., Feng, H., Qing Huang, H. y Lin, H. (2008). Climate-induced changes in crop water balance during 1960-2001 in Northwest China Agriculture. *Ecosystems & Environment*, 127(1-2), 107-118.

Capítulo 3

Empleo de membranas de nanocelulosa de bagazo de agave como tecnologías sustentables

BELKIS COROMOTO SULBARÁN RANGEL *

JAVIER ABRAHAM HERNÁNDEZ DÍAZ **

HASBLEIDY PALACIOS HINESTROZA ***

FLORENTINA ZURITA MARTÍNEZ ****

Introducción

En el último siglo, la demanda de agua y su uso se ha incrementado a un ritmo del doble del crecimiento poblacional (Qasim, Darwish, Sarp y Hilal, 2015). De la misma manera que el consumo, la contaminación del vital líquido ha crecido de una manera alarmante, debido a la poca voluntad política y a la escasez de regulaciones adecuadas para la descarga de aguas negras y grises. Cada vez se vuelve más complicado encontrar fuentes de agua no contaminadas y adecuadas para el consumo humano (Hamjinda, Chiemchaisri, Watanabe, Honda y Chiemchaisri, 2018; Qasim et al., 2015).

* Doctora en Ciencias de Materiales, profesora investigadora, Universidad de Guadalajara, Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

** Maestro en Ciencias en Ingeniería del agua y la energía, Universidad de Guadalajara, javier.abraham.hdez@gmail.com

*** Maestría en Ciencias de Productos Forestales, estudiante de Doctorado en Agua y Energía Universidad de Guadalajara, hasblephiz27@gmail.com

**** Doctora en Ciencias, profesora investigadora, Universidad de Guadalajara, fzurita2001@yahoo.com

Para mitigar esta problemática y hacer frente a la necesidad innegable de agua pura, en las últimas décadas diversas tecnologías de tratamiento de agua se han propuesto y aplicado en los niveles experimentales y de campo (Karapanagioti, 2016; Thakkar, Wu, Wei y Mitra, 2015). Así, pues, entre los sistemas de desinfección más utilizados en la actualidad tenemos: centrifugación, filtración, separación, sedimentación, coagulación y floculación, tratamientos aerobios y anaerobios, ósmosis, nanofiltración microfiltración, adsorción etc. (Guria, Bhattacharya y Gupta, 2005). Igualmente, la cloración, la ozonización, la radiación ultravioleta y el empleo de membranas (Hernández, 2001). Sin embargo, no todas estas tecnologías alcanzan los mismos rendimientos (porcentaje de reducción de patógenos) o costes, o tienen el mismo proceso de regeneración o limpieza. En este sentido, el empleo de membranas para la eliminación o reducción de microorganismos patógenos en aguas se ha convertido en una técnica importante para la purificación de agua (Diez y De la Macorra García, 2014; Zhou, Zhu, Fu, Zhu y Xue, 2015). El uso tecnológico de membrana, se debe principalmente a que estas no requieren la adición de productos químicos, además de tener un uso de energía relativamente bajo. No obstante, es necesario que las membranas presenten las siguientes características: alta permeabilidad, selectividad de contaminantes y mayor resistencia a la adherencia de microorganismos en la superficie. Es por esto que a la fecha se sigue trabajando en la obtención de membranas con estas propiedades (Lee, Bae, Han y Kang 2014).

Los materiales lignocelulósicos son los más abundantes que existen en la tierra, y están formados básicamente por tres polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina (Moon, Martini, Nairn, Simonsen y Youngblood, 2011). En la actualidad, se producen 10^{11} a 10^{12} toneladas de celulosa, principalmente a partir de fuentes de origen vegetal. En el estado de Jalisco en México, el bagazo de *Agave tequilana weber* es uno de los desechos agroforestales más abundante que se generan en el proceso de elaboración del tequila; los volúmenes de desperdicio que se obtienen de este son aproximadamente del 40 % del peso total del agave procesado. Esto genera alrededor de $1,78 \times 10^8$ kg/año (Íñiguez, Valadez, Manríquez y Moreno, 2011)2011. Para dar un valor agregado al bagazo de agave, se propone utilizarlo para extraer celulosa y luego modificarla a escala nanométrica como nanocelulosa. La nanocelulosa se extrae básicamente de cualquier fibra de celulosa. Actualmente, no se han registrado muchos estudios para la obtención de membranas de nanocelulosa de bagazo de agave, por lo que la propuesta presente aportará conocimiento que permita evaluar la factibilidad de uso del bagazo agave en dicha área, y diversificar de forma paralela su campo de uso.

Metodología

Bagazo de *Agave tequilana* variedad *weber* (azul) fue tomado de los residuos del proceso de extracción de la bebida conocida como “tequila” en Jalisco, México. Clorito de sodio (NaClO_2) (80 %), ácido acético (CH_3COOH) (99 %), hidróxido de potasio (KOH) (90 %), hidróxido de sodio (NaOH) (97 %) y ácido bórico (H_3BO_3) (99,5 %) se adquirieron de Sigma-Aldrich (México).

Figura 1. Esquematzación de la experimentación: A) fibras de bagazo de agave; B) celulosa de bagazo de agave; C) nanocelulosa de bagazo de agave, y D) membranas de nanocelulosa de bagazo de agave



Fuente: elaborado por los autores.

Se realizaron las siguientes actividades experimentales, esquematizadas en la figura 1:

a. Caracterización química de fibras de bagazo de agave tequilana

La composición química de las fibras de *Agave tequilana* fue determinada siguiendo diferentes normas estándares internacionales TAPPI. Se determinaron extractivos en acetona de acuerdo con la norma T 280 pm-99 y extractivos en agua siguiendo el método establecido en la norma T 207 cm-99; además, lignina soluble en ácido utilizando la norma T 222 om-02, contenido de cenizas con la norma T 211 om-02 y α -celulosa utilizando la norma T 203 cm-99.

b. Obtención de celulosa

Las fibras de agave fueron colocadas dentro de un digestor de alta presión con agua desionizada con etanol y ácido acético. Se procedió a cerrar el contenedor y la configuración se colocó en 170°C por 1 horas. Una vez enfriado el contenedor, se extrajo el licor resultante y luego se apartó para otros estudios. Las fibras fueron lavadas con abundante agua y secadas a temperatura ambiente; fueron colocadas en un matraz de fondo redondo y agua desionizada. Posteriormente, se añadió en un ratio de 1:25, y se utilizó baño para llevarlo a 75°C . Se emplearon 4 dosis de NaClO_2 (80 %) y 5 mililitros de CH_3COOH (99 %), estas dosis fueron espaciadas por un periodo de 1 hora entre cada dosis. Una vez completado el blanqueo se lavaron exhaustivamente las fibras con agua desionizada y fueron secadas al ambiente.

c. Obtención de nanocelulosa

Luego de obtener la celulosa del bagazo de agave, se procedió a modificarla a escala nano con procesos químicos y físicos. Para obtener los nanocristales se seguirá y modificará la metodología propuesta por Morán, Álvarez, Cyras y Vázquez, (2008), que consiste en una hidrólisis ácida con ácido sulfúrico al 64 %.

d. Preparación de las membranas

Se elaboraron membranas a partir de soluciones de nanocelulosa obtenidas del bagazo de agave, las cuales se usarán directamente en los procesos de filtración de agua. Las membranas se elaborarán por casting. Este método se caracteriza por ser muy simple, pues en principio se prepara la solución y se vierte en una caja de Petri. El solvente se elige de manera que se evapore fácilmente. Las variables posibles de controlar son la concentración, el solvente y en ocasiones se utiliza ultrasonido o magnetismo para intentar controlar la dirección predominante de las fibras.

La celulosa y la nanocelulosa obtenidas del bagazo de agave fueron caracterizadas por técnicas analíticas y de espectroscopia. La importancia de la caracterización fue establecer una correlación entre la estructura, forma y composición química de los polímeros obtenidos con sus propiedades. Las técnicas de caracterización fueron: espectroscopia infrarroja, difracción de rayos X, microscopia electrónica de barrido y microscopia de fuerza atómica. Adicionalmente, se evaluará la porosidad de la membrana midiendo los poros en las fotografías de microscopia con ayuda de programa ImageJ.

Resultados y análisis

Los resultados de la caracterización de bagazo de agave se muestran en la figura 1. Se puede ver que el contenido total de lignina obtenido fue de 20,1 % es similar al reportado para (Kestur, Flores-Sahagun, Dos Santos, Dos Santos, Mazzaro y Mikowski, 2013). También hay diferencias en el contenido de celulosa que se consigue de los reportados. El contenido de α celulosa obtenido en el presente estudio (44,5 %) es menor que el reportado por Kestur et al. (2013) (49,43 %) e Iñiguez et al. (2011) (64,9%). Por otro lado, el contenido de cenizas obtenido (2,8 %) es inferior al reportado para Kestur et al. (2013) (5,3 %), para la fibra procedente de la piña de la planta sin cocinar. El otro componente como hemicelulosa y extractivos son similares al reportado por Iñiguez et al. (2001). Robles, Urruzola, Labidi y Serrano (2015) reportaron $54,60 \pm 1,7$ de celulosa, $16,2 \pm 0,48$ de lignina, $13,95 \pm 0,28$ hemicelulosas, $4,50 \pm 0,07$ cenizas $8,35 \pm 0,39$ extractivos de agua caliente y $5,42 \pm 0,23$ extracto de etanol tolueno.

Tabla1. Composición química del bagazo de agave

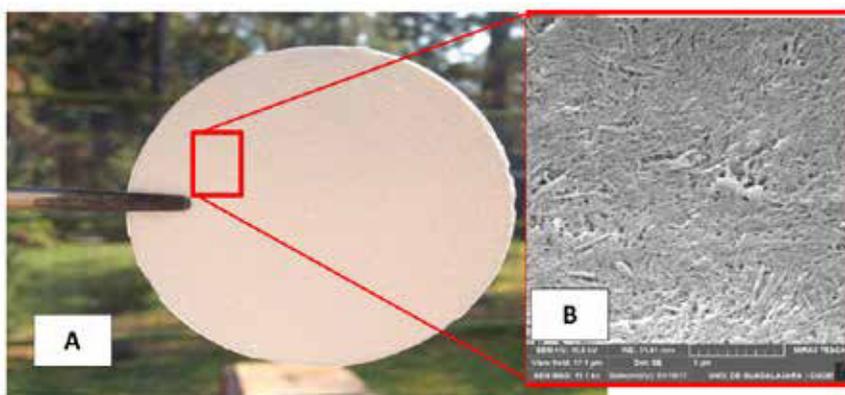
% ceniza	% extractivos		% lignina	% hollocelulosa	
	7.3			69.8	
2,8	% extractivos en acetona	% extractivos en agua	20,1	% celulosa	% hemicelulosa
	3,6	3,7		44,5	25,3

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la morfología de las muestras a escala macroscópica, se observan como pulpa generalmente de conformación irregular (figura 2A). Para analizar mejor la morfología de las nanocelulosa, las muestras fueron observadas en el microscopio electrónico de barrido a diferentes magnificaciones, con el propósito de ver las formas de las fibras y tamaño de poro (figura 2B).

Figura 2. Fotografía de las membranas de nanocelulosa de bagazo:

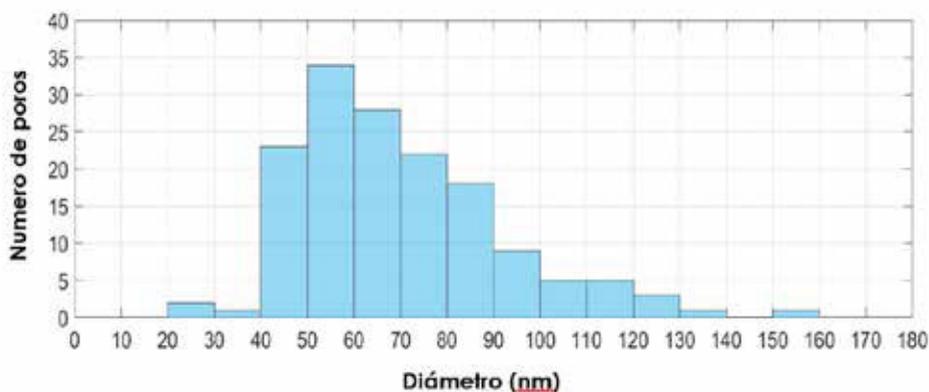
A) escala macroscópica y B) imágenes SEM a escala microscópica 5µm



Fuente: elaboración propia.

Para medir la porosidad de las muestras se analizaron las imágenes SEM, y utilizando el software ImageJ se midió el diámetro de los poros. Así, se estimó que el diámetro de poro mínimo está alrededor de 20 nm y máximo está en 160 nm. Como se puede observar en la figura 3, la mayor cantidad de poros tienen un diámetro promedio de 60 nm.

Figura 3. Distribución del tamaño de poros de las membranas de nanocelulosa de bagazo de agave



Fuente: elaboración propia.

Estos valores de tamaño de poro indican que se trata de un material nano estructurado. Las membranas de nanocelulosa se podrían utilizar en sistemas de nanofiltración, los cuales proporcionan eliminación casi completa de coliformes fecales (tamaño 20-300nm), virus (tamaño 20-300nm), bacterias (tamaño 0,5-5 μ m), metales pesados (tamaño 1-50nm); asimismo, eliminan la mayoría de contaminantes orgánicos y pueden reducir la dureza del agua.

Consideraciones finales

Esta investigación está en proceso y no ha culminado. Se pretende crear una nueva opción para el tratamiento de aguas, aplicando nanotecnología; además, se busca desarrollar un método eficiente para obtener membranas a partir de nanofibras de celulosa del bagazo de agave tequilero, el cual es considerado un residuo de bajo uso. Los valores de distribución de tamaño de los poros encontrados en las membranas de nanocelulosa indican que este material de origen biológico tiene la capacidad de actuar como medio filtrante en sistemas de tratamiento de aguas, ya que el tamaño de muchos contaminantes es mayor al diámetro de los poros encontrados; por tanto, podrían funcionar como un medio físico de barrera basado en los tamaños de estos constituyentes. Los resultados mostrados son el principio de una línea de investigación que consiste en la manipulación de polímeros naturales a escala nanométrica para mejorar procesos de tratamiento de aguas.

Referencias

- Diez, M. T. y e la Macorra García, D. C. (2014). Utilización de membranas como tratamientos terciarios para regeneración de aguas residuales: membranas cerámicas. *Revista Tecnol@ y Desarrollo*, 12, 4-25.
- Guria, C., Bhattacharya, P.K. y Gupta, S.K. (2005). Multi-objective optimization of reverse osmosis desalination units using different adaptations of the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA). *Computers & Chemical Engineering*, 29(9), 1977-1995.
- Hamjinda, N.S., Chiemchaisri, W., Watanabe, T., Honda, R. y Chiemchaisri, C. (2018). Toxicological assessment of hospital wastewater in different treatment processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7271-7279.
- Hernández, A. (2001). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Madrid: Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos.
- Íñiguez, G., Valadez, A., Manríquez, R. y Moreno, M.V. (2011). Utilization of by-products from the tequila industry. Part 10: characterization of different decomposition stages of Agave tequilana webber bagasse using FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1), 61-74.
- Karapanagioti, H.K. (2016). Water Management, Treatment and Environmental Impact. En B. Caballero, P. M. Finglas y F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 453-457). Oxford: Academic Press.
- Kestur, S., Flores-Sahagun, T.H., Dos Santos, L.P., Dos Santos, J., Mazzaro, I. y Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 153-161.
- Lee, C.W., Bae, S.D., Han S.W. y Kang, L.S. (2014). Application of ultrafiltration hybrid membrane processes for reuse of secondary effluent. *Desalination*, 20(2), 239-246.
- Moon, R., Martini, A., Nairn, J., Simonsenf, J. y Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40, 3941-3994.
- Morán, J.I., Álvarez, V.A., Cyras, V.P. y Vázquez, A. (2008). Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose*, 15(1), 149-159.
- Qasim, M., Darwish, N.A., Sarp, S. y Hilal, N. (2015). Water desalination by forward (direct) osmosis phenomenon: A comprehensive review. *Desalination*, 374, 47-69.

- Robles, E., Urruzola, I., Labidi, J. y Serrano, L. (2015). Surface-modified nano-cellulose as reinforcement in poly(lactic acid) to conform new composites. *Industrial Crops and Products*, 71, 44-53.
- Thakkar, M., Wu, Z., Wei, L. y Mitra, S. (2015). Water defluoridation using a nanostructured diatom-ZrO₂ composite synthesized from algal Biomass. *Journal of Colloid and Interface Science*, 450, 239-245.
- Zhou, D., Zhu, L., Fu, Y., Zhu, M. y Xue, L. (2015). Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies. A review. *Desalination*, 376, 109-116.

Capítulo 4

Fuerzas entrópicas en la frontera del sistema urbano del área metropolitana de Guadalajara

GONZÁLEZ PÉREZ MARIO GUADALUPE*

Introducción

El proceso de habitar el espacio geográfico origina evidentemente transformaciones directas en su fisonomía original, con efectos que pueden ser identificados a través de la observación directa. Asimismo, en estos escenarios la ocurrencia está en función de intervalos relativamente cortos; es decir, estas manifestaciones no implican inicialmente un análisis riguroso de por medio. No obstante, existen también otro tipo de efectos menos visibles inicialmente, denominados efectos indirectos, los cuales no se logran percibir al corto plazo; sus consecuencias en la habitabilidad suelen ser inciertas, aunque con características isomorfas en diversas secciones similares del espacio periurbano habitado, donde el resultado se identifica por medio de la revisión y el análisis de las complejas hibridaciones en el proceso de habitar el sistema urbano. Esto ha conducido a que la ciudad logre evidenciar la enorme diversidad del paisaje urbano.

En este contexto, el crecimiento demográfico está marcado por cambios acelerados en la concentración de población y habitabilidad en nodos con delimitaciones

* 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. e-mail: mario.gonzalez.direccion@gmail.com

endebles; es decir, estas se diluyen visualmente en la dimensión espacio-tiempo y se difumina la frontera del sistema. Esto no implica necesariamente que los nodos no contengan límites, evidentemente, los nodos se encuentran delimitados espacial y administrativamente; no obstante, lo que resulta peculiar es la temporalidad y la flexibilidad de la ubicación geográfica de ese límite habitacional relacionado con el periurbano. En otros términos, el límite entre el urbano y el no urbano cambia de posición en función del tiempo y del incremento habitacional supeditado al aumento poblacional; situación que sin duda provoca transformaciones irreversibles en el territorio, sobre todo, porque “[...] la irreversibilidad es algo común del universo entero, no es relativa sólo a una parte del universo” (Prigogine, 1991, p. 63).

Este trabajo se interesa por el urbanismo que se está realizando en los nodos poblacionales con características metropolitanas, particularmente el urbanismo relacionado con la planificación habitacional en el periurbano del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). Esto debido a que en las ciudades de índole metropolitano el resultado de la construcción habitacional (la vivienda) se ha convertido en una mercancía sujeta al análisis de la ecuación del costo-beneficio; con saldos inmediatos a favor de unos cuantos como el constructor, el intermediario bancario, el promotor de la vivienda, el proveedor de suministros, etc., y saldos no del todo positivos *a posteriori* para otros como el comprador, quien efectivamente logra la adquisición de un bien inmueble. Esto último ya es un aliciente o acierto en sus metas personales de obtener un patrimonio en lo individual o familiar. No obstante, muchas veces este comprador puede ser un derecho-habiente o causahabiente, es decir, una persona asalariada con posibilidad de recibir prestaciones laborales y beneficios por parte del Estado para la adquisición de un bien inmueble como la vivienda, los terrenos o los préstamos para ampliaciones o remodelaciones. En México, por ejemplo, el organismo que pretende el fomento a la vivienda es Infonavit. Asimismo, por medio de las entidades bancarias se facilita, en teoría, el otorgamiento de hasta el 90% del financiamiento a largo plazo del avalúo de un bien inmueble (no del precio de venta); este normalmente no supera los 20 o 25 años, dependiendo de la entidad bancaria. En este sentido, también se combinan las partidas ofertadas entre el Infonavit y la banca. Como ejemplo se tienen los programas de acceso al financiamiento como los identificados paquetes Cofinavit o Apoyo Infonavit, entre otros.

La mayoría de los compradores se encuentran limitados presupuestalmente para adquirir un bien inmueble de un solo pago (al contado), aspecto que los lleva a asumir un extra en costos por intereses y comisiones o, incluso, riesgos por posibles demoras en el pago de la mensualidad de los productos crediticios ofertados. Estos

créditos normalmente están en función de la edad del solicitante, el ingreso mensual recibido y el tiempo de aportación laboral (cotización), lo cual pone un tope al préstamo, y en función de este tope se mercadean las posibilidades de compra de la vivienda. En efecto, normalmente se facilita la compra en algunas fracciones del periurbano; las menos favorecidas en cuanto a conectividad con el urbano o las que están ubicadas en geografías propensas a inundaciones, como zonas bajas de tipo endorreico que difícilmente tienen salida de los flujos hídricos y acumulan las escorrentías, laderas con posibilidad de deslaves o con enorme dificultad para mantener la calidad de la infraestructura viaria a causa de la erosión de las precipitaciones, antiguas parcelas agrícolas o incluso zonas con atributos para la recarga freática. En estos lugares se encuentran los precios de venta más accesibles para este sector de la población, al cual hay que adherirle un excedente de costos por el acondicionamiento del inmueble, como protecciones metálicas de puertas y ventanas, instalación del servicio de electricidad, colocación de algún tipo de acabado interior (pisos cerámicos, loseta, etc.), muebles necesarios como armarios, cocina, reservorios para agua, entre otros. Esto sin duda eleva la inversión inicial, sin embargo, los compradores una vez convertidos en residentes encuentran otros costos no considerados en el presupuesto inicial; estos costos de índole social están asociados con el proceso de habitar ese espacio geográfico.

La experiencia cotidiana de habitar el periurbano va aportando desventajas para el comprador, quien identifica un entorno hostil acumulativo, con entropías en el suministro hídrico, al percatarse de que la provisión de agua potable no es continua todos los días, al ver que se presentan cortes del suministro de agua o que esta no llega con la presión adecuada para abastecer una segunda planta de la vivienda. Asimismo, se van dando insuficiencias de servicios de saneamiento al no pasar el recolector de basura, lo que genera acumulación al exterior de las viviendas, con sus respectivas consecuencias de olores desagradables y posibles enfermedades.

En materia de infraestructura hidráulica, la deficiencia en la conducción de los excesos de las precipitaciones genera incrementos de los tirantes de agua y, consecuentemente, inundaciones. Estos costos, aunados a los anteriores, encarecen la vida en el periurbano y complican el desarrollo armónico de la entidad familiar y vecinal, respectivamente. Lo anterior, de manera paulatina, va configurando una desorganización colectiva y disminuye consecuentemente el compromiso de trabajo comunitario. En este sentido, toma relevancia la planificación sistémica, es decir, el proceso de planificación que considera los preceptos fundacionales de la teoría de los sistemas. Este modo de planificar considera los preceptos conceptuales de Bertalanfy (1968), Prigogine (1983), Maturana y Varela (1984), Luhmann (1984) y

muchos más que han contribuido con sus aportaciones al análisis y a la discusión de los sistemas. Esto permite asumir que desde esta fundamentación teórica resulta posible comprender y emprender integralmente iniciativas que permitan minimizar o canalizar los niveles de entropía en el periurbano, pues tan solo en materia hídrica se ha incrementado la necesidad del consumo y, consecuentemente, los costos de los procesos de extracción, tratamiento y distribución, que complican para la autoridad llevar el vital líquido hacia los últimos hogares de la frontera del sistema.

En primer término, el objetivo de este trabajo pretendió identificar las fuerzas causales de entropía; es decir, las fuerzas que desestabilizan la homeostasis del urbano, particularmente del periurbano; sin embargo, hay que decirlo, el periurbano no es una entidad fuera del sistema urbano, sino su frontera, donde su habitabilidad preserva características particulares respecto a la habitabilidad del urbano. En este sentido, se parte del supuesto que considera que las fuerzas de carácter entrópico provienen del proceso de producción habitacional periurbana, toda vez que este ejercicio se encuentra ausente de fundamentos sistémicos de planificación. De esta forma, “[...] cualquier anomalía que ocurra en alguno de ellos afectará el estado homeostático general y consecuentemente, generará entropía en el sistema-ciudad” (González, 2017, p. 61). Incluso, podemos hablar de la configuración de un sistema urbano o ciudad entrópica, es decir, un centro de población con características urbanas donde se tiene una planificación deficiente, insuficiente y no sistémica, la cual “ha conducido a un estado de desorden y problemas espaciales diversos, tanto ambientales como económicos y sociales, los cuales se acentúan continuamente” (González, 2017, pp. 61-63). Por otro lado, la investigación reflexiona acerca del proceso de planificación habitacional que se ha venido intensificando las últimas décadas en las ciudades metropolitanas; la cual, sustentada en una política no sistémica, o al menos de sistema no abierto, ha ocasionado hibridaciones complejas con resultados inciertos en la periurbanización.

Marco teórico

En relación con los recursos hídricos, se han realizado diversas actuaciones irreversibles en el ambiente, para satisfacer las necesidades de consumo del sistema urbano. En este sentido, derivado de estas transformaciones territoriales se han obstruido, cubierto y modificado los escurrimientos superficiales originales de ríos y arroyos, que otrora conducían los caudales efímeros, intermitentes o perenes de agua cruda sin mayor contaminación que el polvo, sólidos suspendidos o coliformes fecales de la fauna nativa, a canales artificiales revestidos o no de caudales máximos y mínimos de aguas negras o grises con altas cantidades de tóxicos y otras sustancias

producto de la actividad industrial desmedida, la pobre educación ambiental de los habitantes del sistema y al manejo no sustentable de los desechos sólidos; esto aunado a la permisión, omisión o corrupción de la autoridad gubernamental (figura 1).

Figura 1. Canal de aguas negras en el malecón del municipio de Juanacatlán, Jalisco, 2017



Fuente: elaboración propia.

Todo este conjunto de fuerzas entrópicas ha llevado a la destrucción de la vegetación y fauna nativas, la disminución de la cantidad y calidad del agua para el manejo agropecuario y consumo humano, la ocupación y modificación del suelo agrícola y, en suma, “[...] se han transformado para siempre las condiciones originales del territorio intervenido y han provocado un mosaico de formas y paisajes con menor o mayor grado de afectación” (González, Retamoza, Albores y Guerrero, 2016, p. 91).

A lo anterior habría que adherirle la ausencia de metodologías hidrológicas validadas para cada una de las zonas altamente antrópicas, así como de medición precisa de la precipitación y del caudal (Rojas y González, 2015, p. 72); sobre todo, en las ciudades de corte metropolitano, donde las condiciones físicas y capacidad de las obras de captación, transporte y disposición final de la escorrentía superficial pluvial y sanitaria se encuentran rebasadas (González y Asprilla, 2016, p. 92), de-

bido a la “insuficiencia de la conducción hidráulica” (Rojas y González, 2015, p. 72). Por este motivo, en la medida que la expansión urbana y la planificación del uso del suelo no se realice de forma conjunta, el crecimiento ocurrirá anárquico y carente de espacio para el manejo de los escurrimientos superficiales (Acosta, 2001, p. 17), o el manejo de materias primas y residuos líquidos y sólidos riesgosos para la salud humana, con posibilidad de migrar hacia los subsistemas de acuíferos locales (Unzueta, 2014, pp. 7 y 8). Esto es muy importante porque la extracción de las aguas subterráneas no solo ha sido de gran trascendencia para cubrir las necesidades hídricas del campo y la ciudad, sino que además en algunas regiones representa la única fuente de abastecimiento para la población (Imacméxico.com, 2004).

En México, el proceso de metropolización comenzó en los años cuarenta del siglo pasado (Moreno, 2008), en una manifestación clara que empezó a diferenciar varios nodos del país que anteriormente se identificaban como nodos semirurales, de nodos de carácter no rural a nodos urbanos, como Ciudad de México, la cual se convirtió en el primer sistema urbano en rebasar las delimitaciones político-administrativas; posteriormente, le siguieron Guadalajara y Monterrey. En estas ciudades el sector industrial impulsó en la periferia un crecimiento demográfico que permitió la configuración de atractivos para la población proveniente de diversas localidades rurales próximas.

Aunado a lo anterior, el crecimiento alométrico de estas ciudades metropolitanas recibe un impulso extra con la implantación del modelo neoliberal alrededor de los años ochenta del siglo pasado, junto al control de las instituciones de asistencia social por parte de un partido político (el PRI). Desde este partido se tenía también un control clientelar ciudadano por medio de la comercialización de programas sociales que, influenciados por un discurso reiterativo fundamentado en los preceptos del behaviorismo eran difundidos por la empresa que contralaba hasta ese entonces la transmisión de la información, el entretenimiento y la verdad a nivel nacional de forma gratuita (Televisa).

Este escenario favorable le permitió al Gobierno vencer los obstáculos y las divergencias de los subgrupos que constituían su propio partido político, contener bajo diversos mecanismos de coerción, cesión, presión o negociación la posición de los partidos políticos opositores y otorgar privilegios para ciertos grupos organizados y con capacidad política y económica para defender sus intereses (sector empresarial, sector bancario, sindicatos, otros). En este sentido, en materia inmobiliaria, uno de los problemas más grandes relacionado con la vivienda radica en

el dimensionamiento, el cual origina hacinamiento, y la imitación de prototipos, que repiten hasta las fallas estructurales provocadas por los hundimientos diferenciales de la cimentación, la especulación del precio de venta, que modifica los usos del suelo y el modelo de construcción horizontal racionalista que consume grandes cantidades de tierra fértil, incrementa los costos de proveer infraestructura de acueducto y alcantarillado y artificializa zonas con atributos naturales para la recarga hídrica. Esto incrementa los índices de escurrimiento y cambia las direcciones de la red de flujo.

Estas conductas no son exclusivas de alguna parte del país, sino que a lo largo de todo México y en diversas ciudades del globo se encuentran isomorfismos en los modelos tipológicos de las viviendas, donde los diseños habitacionales establecidos por estatus, negligencia o interés comercial, evaden el proceso creativo de la innovación que harían que la nueva construcción se adapte a las condiciones geográficas, sociales, culturales y económicas de una determinada población (González y González, 2016, p. 534).

En este contexto, en México es posible identificar tres tipos de habitar la periurbanización, en función de características socioeconómicas del asentamiento residencial; es decir, se van a encontrar asentamientos espontáneos, asentamientos suburbanos y asentamientos de construcción social. Los primeros se caracterizan por estar circunscritos dentro de un mercado informal, sin documentación que avale por parte del Estado la posesión del terreno donde se realiza de manera progresiva la construcción de la vivienda. Esta situación es diferente a los segundos y terceros, que sí se encuentran en la formalidad institucional (Signorelli, 1999, p. 57). Las cualidades isomorfas de estos tres tipos de asentamientos radican en la ubicación geográfica; es decir, a los tres es posible encontrarlos en el periurbano, aunque con diferencias en el diseño, dimensionamiento y las accesibilidad a los servicios (figuras 2 y 3).

Figura 2. Asentamiento de construcción social en el periurbano de La Azucena, Jalisco, 2017



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Asentamiento sub urbano en el periurbano de El Moral, Jalisco, 2017



Fuente: elaboración propia.

Se puede asumir entonces que los asentamientos espontáneos, por el hecho de estar al menos inicialmente fuera del marco normativo, carecen del acceso a los servicios de agua entubada, alcantarillado y, en general, de infraestructura que permita un habitar digno; amén de que el proceso progresivo de la autoconstrucción se identifica por la precariedad y el uso de materiales frágiles como cartón, láminas, palma, hojarasca, plásticos, telas y otros. En resumen, en este grupo se incluyen las familias que no cumplen con los requisitos para acceder a un crédito de vivienda de interés social, y que mucho menos pueden aspirar a los productos que oferta la Banca (López, 1995, pp. 14-30). Esto debido a que no logran solventar los ingresos necesarios, porque trabajan de manera eventual en la industria de la construcción o informal como vendedores ambulantes en calles, cruceros viales, tianguis de accesorios de segunda mano, casa por casa o bien como pepenadores en rellenos sanitarios y basureros ubicados en la periferia. No obstante, dentro de los asentamientos formales, esos que avala y autoriza el Estado, los residentes de viviendas catalogadas como construcción social experimentan también la entropía del habitar periurbano. Lo anterior porque, aunque fueron dotados de servicios mínimos como la red hidráulica para el suministro y correspondiente desalojo hídrico en la experiencia cotidiana del habitar periurbano estos residentes no reciben adecuadamente dichos servicios, lo que los lleva a buscar mecanismos que les permita contener el líquido. Sin embargo, cuando la ubicación del conjunto habitacional se encuentra en zonas topográficas idóneas para las inundaciones y se carece de la infraestructura para el desalojo —aunado a obras de transporte de desechos que emiten aromas fétidos y se convierten en riesgo e infecciones— la entropía en el periurbano complica la integración comunitaria y el compromiso social con la unidad vecinal (figura 4).

Figura 4. Tiradero en áreas de uso común en La Azucena, Jalisco, 2017



Fuente: elaboración propia.

Metodología

Para la investigación se inspeccionan las condiciones del habitar racionalista-progresivo en el periurbano del AMG, sobre todo, la experiencia de los residentes ubicados en el fraccionamiento llamado Galaxia-Bonito-Jalisco (GBJ), popularmente conocido como La Azucena, ubicado en el municipio de El Salto. De aquí, hemos encontrado información sobre el nivel educativo de la población, las condiciones de infraestructura y acceso a los servicios básicos, las condiciones de empleo, las características y precios de las viviendas y los diversos escenarios en torno a los recursos hídricos, entre otros.

Estos datos provienen del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), del Instituto Nacional para el Fomento de la Vivienda de los Trabajadores (Infonavit) y de los productos hipotecarios ofertados por la Banca. Asimismo, con datos que se obtuvieron de la inspección *in situ* en el territorio físico de La Azucena, se realizaron entrevistas con los residentes periurbanos; en total se hicieron 30 entrevistas en enero, febrero y marzo de 2017, considerando la

instrumentación cualitativa de la bola de nieve. Esta muestra selectiva tuvo como punto de inicio al representante de los colonos residentes en el fraccionamiento. En este sentido, los hallazgos encontrados son explicados desde los fundamentos de la teoría de los sistemas, considerando a la ciudad como el sistema urbano y, a su vez, como la receptora, procesadora y emisora de materia y energía.

En efecto, no siempre es posible destinar un tiempo prolongado para realizar el proceso de indagación *in situ*. Esto no solo se vuelve complejo, sino además que muchas veces es poco probable concretar, incluso a grado tal de ser un privilegio al que pocos investigadores pueden acceder (Jeffrey y Troman, 2004). En este sentido, las investigaciones etnográficas tradicionales son solventadas en función del tiempo destinado al trabajo de campo, que generalmente se prolonga con el argumento de que a mayor tiempo, mejor será la comprensión del fenómeno estudiado y los resultados obtenidos. No obstante, los ejercicios cuasi etnográficos se simplifican al dedicar menor tiempo a las actividades en campo (Silva y Burgos, 2011), sin demeritar los hallazgos que puedan incitar a la reflexión para un análisis (González, 2017). De igual forma, por medio de la revisión de contenidos temáticos ha sido posible la descripción de los mensajes, el análisis y el vertido de inferencias relativas a las condiciones de producción y recepción de los significados sociales (Bardin, 1996; Burgos, Silva, Troncoso y Franco, 2013) (ver tabla 1).

Tabla 1. El procedimiento metodológico, 2017

Instrumentación metodológica	Técnicas utilizadas	Objeto de estudio
Análisis de contenido	Revisión documental	Teoría de los sistemas (Bertalanffy, 1968; Maturana y Varela, 1980; Luhmann, 1984). Habitabilidad periurbana (López, 1995; Signorelli, 1999; Giglia, 2012, González y Asprilla, 2016, Barranco y González, 2016)
Inspección <i>in situ</i>	Observación participante	Habitar racionalista-progresivo
Cuasi-etnografía	Entrevistas formales e informales	Residentes periurbanos del habitar racionalista progresivo

Fuente: elaboración propia.

Resultados y análisis

Se ha comentado la relevancia de considerar el enfoque de sistemas en el proceso de planificación habitacional; por ello, la utilización de diferentes conceptos o categorías de conceptos, como el sistema urbano y el ambiente, o en otros términos, lo que

no pertenece al sistema urbano. Sobre este último término, es preciso recalcar que, aunque puede ser concebido como un sistema de mayor envergadura, para nuestro caso no es el sistema que se estudia; aquí se investiga lo urbano, y así el ambiente se acercaría un poco al concepto de campo (Ruíz, 2001, p. 7).

El análisis y estudio de la composición y el funcionamiento del sistema urbano a través de las diversas acepciones físico-químicas, biológicas o matemáticas han influenciado el marco conceptual de la teoría, a grado tal que estos conceptos bien pudieran ser utilizados por el urbanismo en su particularidad de planificación habitacional; sobre todo, términos como materia y energía, que pueden facilitar la comprensión de “lo urbano”, desde la perspectiva de sistema. Desde luego, aspectos como la incertidumbre o determinación de su comportamiento ante la presencia de las fuerzas internas o externas, o también conocidas como fuerzas desestabilizadoras y estabilizadoras, o fuerzas entrópicas y neguentrópicas (González, 2017a, 2017b; González, Lizcano y Asprilla, 2017), permiten identificar características particulares en el habitar periurbano; entonces, si partimos de que el periurbano puede ser concebido como una franja o un segmento con comportamientos híbrido-complejos, es decir con mixturas de difícil comprensión, es posible suponer que:

- a. El periurbano es un segmento con comportamientos híbrido-complejos.
- b. Las actuaciones antrópicas implican no solo transformaciones morfológicas, sino también incertidumbre en la magnitud y estructura de esas transformaciones.
- c. La transformación morfológica de las condiciones *in situ* son inevitables y difícilmente reversibles.
- d. Se originan condiciones propicias para la conformación de subsistemas emergentes.
- e. En algunas fracciones del periurbano se identifica entropía en su habitar (características isomorfas), asociada con la provisión de servicios básicos (infraestructura hidrosanitaria, otros).
- f. Se torna complejo el análisis de la problemática puntual; por un lado, debido a la interacción con el no urbano y, por otro, al desplazamiento irreversible en el espacio-tiempo. Es decir, la posición cartesiana del periurbano es temporal, y la porción espacial se incorpora en determinado tiempo al urbano. Así, esto nos lleva a discutir los límites entre el urbano y el periurbano, y los límites entre el periurbano y el no urbano.

Consideraciones finales

El sector de la construcción habitacional se ha caracterizado, en general, por una concepción puramente comercial de los productos ofertados y subordinados al imaginario, que supone que menores costos representan mayores ganancias, aunadas a la especulación del precio del suelo (González y González, 2016, p. 7). Esto ha generado en las últimas décadas, que las políticas de vivienda social en México configuren territorios urbanos dispersos y de baja densidad, con fuerte presencia del habitar individual confinado a espacios cerrados (Barranco y González, 2016, p. 167).

En este habitar periurbano se identifican los componentes entrópicos asociados a la dotación de infraestructura hidrosanitaria, viaria, organizacional y de seguridad. Hay evidencia de escasez hídrica para el consumo humano, inundaciones recurrentes en verano, debido al desbordamiento del arroyo Las Pintas y la deficiencia de infraestructura de drenaje. En el tema organizacional es evidente la ausencia de una estructura social vecinal comprometida con su entorno inmediato; en síntesis, las fuerzas hostiles que contribuyen con escenarios complejos se circunscriben en los límites del sistema urbano, donde convergen flujos de materia y energía originada por los procesos antrópicos.

Esta característica de la frontera periurbana compromete cada vez más el funcionamiento homeostático de los componentes constituyentes, sobre todo porque el elemento humano está incrementando aceleradamente sus necesidades, de habitacionales, de movilidad, recursos hídricos, fuentes energéticas, alimentarias, etc. En efecto, existen actuaciones antrópicas que pretenden contrarrestar su propio actuar, denominadas como acciones neguentrópicos (González, 2017). Como ejemplo de lo anterior se tiene el tratamiento de las aguas, el reciclaje de materiales, la utilización de ecotecnias, nuevos marcos regulatorios de uso y consumo del espacio o la cultura de escasez que tenderían hacia la disminución de entropía en el sistema. El periurbano, entonces, como franja que delimita al campo de la ciudad es un área ubicada en los límites del sistema, donde se experimenta el proceso de urbanización. De esta forma, el escenario de la localidad Galaxia Bonito-Jalisco identifica problemas en su proceso de habitar, con riesgos ambientales graves, que se acenúan mediante la carencia de infraestructura en materia de salud pública, la cual es concentrada en el sistema urbano. Esto origina desabasto de medicamentos en los centros de salud e incentivan la inserción del sector privado, además, la ausencia de una integración comunitaria, el trabajo colaborativo y la instrumentación de mecanismos de organización vecinal contribuyen con escenarios hostiles en el proceso de habitar la periurbanización.

Referencias

- Acosta, J. (2001). Las inundaciones en la Argentina. En A. Kreimer, Ad. Kullock y J. D. Valdés (Eds.). *Inundaciones en el Área Metropolitana de Buenos Aires* (pp. 17-32). Washington, D. C.: The World Bank. Recuperado de <http://siteresources.worldbank.org/INTDISMGMT/Resources/buenosaires.pdf>
- Bardin, L. (1996). *El análisis de contenido*. Madrid: Akal.
- Barranco, C. y González, M. (2016). El transporte intracondominal en la movilidad cotidiana de la periurbanización: el enlace comunitario del Área Metropolitana de Guadalajara. *Revista Transporte y Territorio*, 14(1). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333046307010>
- Bertalanffy, L.V. (1976). *Teoría general de los sistemas*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Burgos C., Silva C., Troncoso S. y Franco, B. (2013). Lo cotidiano en el transporte público de Culiacán: hacia una movilidad urbana sostenible y segura. *Revista de Estudios Urbanos y Ciencias Sociales*, 1(3), 123-139. Recuperado de http://www2.ual.es/urbs/index.php/urbs/article/view/burgos_silva_troncoso_franco
- Giglia, Á. (2012). *El habitar y la cultura: perspectivas teóricas y de investigación*. Barcelona: Anthropos.
- González, M. (2017). Movilidad motorizada e infraestructuras de transporte en Culiacán: una situación entrópica. En I.J. Jasso (Coord.), *Poder, Cultura y Desarrollo* (pp. 60-77). Ciudad de México: Universidad de Guanajuato.
- González, M. (2017). Uber y movilidad urbana en la geografía metropolitana de Guadalajara: auge y declive. *Revista Geograficando*, 13(1). Recuperado de <http://www.geograficando.fahce.unlp.edu.ar/article/view/GEOeo20/8452>.
- González, M. y Asprilla, Y. (2016). La habitabilidad del espacio periurbano en el área metropolitana de Guadalajara: entropías en la provisión de servicios hidrosanitarios. *Tecnogestión*, 13(1), 92-106. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/12130>
- González, M. y González G. (2016). Techos verdes y mercado inmobiliario en México: escenario actual y expectativas en el marco de la energía. *Tecnología y Construcción*, 32(1), 6-15. Recuperado de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_tc/article/view/12358
- González, M., Lizcano J. y Asprilla, Y. (2017). Uber en el medio ambiente urbano: Una revisión desde la teoría de sistemas en el caso Mazatlán. *Redes de Ingeniería*, 0, 129-137. Recuperado de <https://doi.org/10.14483/2248762X.12484>

- González M., Retamoza J., Albores R. y Guerrero, A. (2016). Gestión integral de cuencas hidrográficas: una alternativa a la sustentabilidad de los recursos hídricos en México. En *Lacandonia*, 10(1), 91-98. Recuperado de <http://cuid.unicach.mx/revistas/index.php/lacandonia/article/view/398/364>
- Jeffrey, B. y Troman, G. (2004). Time for ethnography. *British Educational Research Journal*, 30(4), 535-548.
- IMACMéxico (2004). *Tema 9. Los acuíferos del país*. Recuperado de http://imacmexico.org/file_download.php?location_S_U&filename=11036764531Final_Tema_9_Los_acu%EDferos_del_pa%EDs_300904.doc
- Maturana, H. y Varela, F. (1984). *El árbol del conocimiento*. Santiago: Organización de Estados Americanos (OEA), Editorial Universitaria.
- Moreno, O. (2008). *Desarrollo económico y urbanización en el oriente de la zona metropolitana de la ciudad de México, 1980-2010*. Ciudad de México: Porrúa.
- López, E. (1995). *La vivienda en la zona metropolitana de Guadalajara*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Luhmann, N. (1984). *Sistemas sociales*. Barcelona: Anthropos, Union des Association Internationales (UIA), Centro de Estudios de Justicia de las Américas (CEJA).
- Prigogine, I. (1983). *Tan solo una ilusión: una exploración del caos al orden*. Barcelona: Tusquest.
- Prigogine, I. (1991). *El nacimiento del tiempo*. Buenos Aires: Tusquest.
- Rojas, D. y González, M. (2015). Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 69-83. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/317518007_Incertidumbre_en_los_modelos_hidrologicos_y_planeacion_de_obras_hidraulicas_en_Mexico.
- Ruíz, L. (2001). Sistemas urbanos complejos acción y comunicación. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, (32), 1-78. Recuperado de <http://polired.upm.es/index.php/ciur/article/view/246/242>
- Signorelli, A. (1999). *Antropología urbana*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Silva, C. y Burgos, C. (2011). Tiempo mínimo-conocimiento suficiente: la cuasi etnografía sociotécnica en psicología social. *Psicoperspectivas*, 2(11), 87-108. Recuperado de <http://www.psicoperspectivas.cl/index.php/psicoperspectivas/article/view/146/177>
- Unzueta, F.B. (2014). Los mantos acuíferos en B.C.S. (Tesis de grado). Universidad Autónoma de Baja California Sur, Baja California Sur.

Capítulo 5

La cátedra del agua en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas: una apuesta al trabajo en redes con las comunidades por la sostenibilidad del recurso hídrico

HELMUT GARCÍA ESPINOSA*

Introducción

Las sociedades en los países con recursos hídricos relativamente abundantes tienden a desarrollar procesos adaptativos de usos del recurso hídrico, que en algunos casos pueden llevar al despilfarro y al paulatino deterioro de las fuentes abastecedoras, lo que desequilibra las dinámicas de los ecosistemas que garantizan procesos como la regulación hídrica y la amortiguación a los efectos de la erosión. A lo largo de la primera década en el siglo XXI, los mensajes, encuentros y compromisos en el orden internacional, para poder marchar por una senda distinta a la del actual proceso de deterioro ambiental y sus consecuencias en la estabilidad de lo humano, como en el caso del cambio climático global, exponen la urgencia de tomar en múltiples dimensiones y aspectos del hacer social acciones de intervención en la protección del agua y la obligatoriedad de reconocer el derecho de las otras poblaciones no humanas a contar para su vitalidad con el recurso hídrico suficiente y libre (Unesco, 2000).

En Colombia, las iniciativas alrededor de los recursos hídricos en los últimos 30 años se asocian a las orientaciones sectoriales instauradas en el marco de la Ley

142 de 1994 (régimen de servicios públicos) y las transformaciones institucionales que en materia de la gestión de los recursos naturales se han dado por la implementación y reglamentación del Sistema Nacional Ambiental (Ley 99 de 1993), como resultado de acuerdos para dar alcance a lo planteado desde la década de los setenta con la aprobación del código de los recursos naturales. En este sentido, las reformas institucionales, como las adelantadas en el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Territorial (2010), han dado paso a que el tema del agua mantenga una importancia central en la agenda pública y con ello la búsqueda de mecanismos que logren articular otras políticas públicas como las de educación ambiental e investigación, que demandan la participación de instituciones como universidades, centros tecnológicos, empresas, organizaciones internacionales y otros agentes de cooperación, con una amplia base participativa social.

Frente a la actual crisis de los recursos hídricos, se plantea la necesidad de abordar diferentes tipos de estrategias para acompañar a las comunidades en el reto de reconocer en primera instancia las problemáticas sentidas del agua: acceso al agua potable, abastecimiento agrícola, generación hidroeléctrica, manejo de riesgos socioambientales, entre otros aspectos. Así, pues, se debe revisar y estructurarse de qué manera la educación (en sus múltiples formas), como factor de culturización, puede contribuir a la búsqueda de las alternativas de respuesta a las diferentes situaciones que se crean con las tensiones en el manejo sostenible del agua.

En el caso de la Cátedra del Agua propuesta por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, su estructuración constituye un espacio abierto institucional para el conocimiento integral en el uso sostenible del recurso hídrico, considerando su tradición académica en programas vinculados a los recursos naturales y al ambiente, así como su fortaleza en investigaciones sectoriales que centran su atención en desarrollar una iniciativa articular para atender desde la academia los problemas nacionales, regionales y locales de sostenibilidad urbana y rural. Busca, además, ser un espacio interdisciplinario a las iniciativas de cambio socioambiental alrededor de los recursos hídricos con una mirada territorial; también va orientada al fortalecimiento de los procesos de investigación y proyección social en la ciudad región, en relación con la agenda prioritaria de adaptación al cambio climático, y apunta a la facilitación de espacios de cooperación nacional e internacional con intereses sobre el recurso hídrico con enfoque regional y suprarregional. Es una motivación hacia un cambio cultural en el uso y manejo del agua con una base científica en los espacios locales y en particular en las comunidades más vulnerables.

La Cátedra del Agua, en la Universidad Distrital, en Bogotá, es entendida como un proyecto científico y cultural, donde convergen los diferentes intereses de expertos,

instituciones y comunidades en relación con el conocimiento y la aplicación de prácticas socios ambientales sostenibles en el uso del agua, teniendo como apoyo espacios de diálogo e intercambio de experiencias con base en la tecnología y la educación. Este proceso es liderado por la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales y los grupos de investigación de los programas tecnológicos, administrativos e ingenieriles que la componen en cabeza del grupo de Investigación PROGASP-GAIA y la RED BACATA-IT.

Alcances de la formación en el tema del agua

Las instituciones del sector educativo en las diferentes naciones han asumido una serie de compromisos formativos que acompañan las acciones de investigación y divulgación de docentes y grupos de investigación articulares a las disciplinas y ciencias base, con las que se relacionan diferentes iniciativas públicas y privadas, que se ocupan del tema de la gestión integral de los recursos hídricos. Por eso no es extraño asociar un conjunto de actividades universitarias con la discusión y puesta en conocimiento de los avances científicos y metodológicos que, en materia de los recursos hídricos con diferentes enfoques, como los sociales, económicos, hidráulicos y tecnológicos, se construyen permanentemente con las comunidades académicas a través de foros, congresos y simposios sectoriales.

Sin embargo, no es la única circunstancia que puede llevar a buscar en la vía educativa una mayor participación social de los actores involucrados en el uso, el manejo y la conservación del agua. Las agencias locales y regionales de orden estatal, como en el caso de América Latina en países como México, Chile y Colombia, han tenido respaldo en pactos con las iniciativas empresariales privadas, donde su eje productivo es el recurso hídrico, como sucede en la generación hidroeléctrica, el aprovisionamiento de riego agroindustrial y el uso en la minería. En este caso, los agentes privados comprometen recursos de apoyo social y ambiental, considerando las medidas de compensación y de prevención ambiental que demanda la sostenibilidad de sus proyectos productivos (Peña, 2016)

Una de estas importantes iniciativas con enfoque suprarregional es la adelantada en proyectos como Suizagua, en los países de la región Andina, donde la alianza pública privada participa de la construcción de modelos de comportamiento culturales vinculantes al agua y orientados, en este caso, hacia la evaluación de huella hídrica. Otras iniciativas cuentan con recursos de cooperación, que con apoyo de ONG territoriales y locales se han armonizado la acción de intervención socioambiental desde la presencia escolar de motivadores y expertos, considerando el papel

transformador de los niños y las niñas en las prácticas habituales en la sostenibilidad del recurso hídrico a futuro.

En Colombia, el proceso de fortalecimiento institucional contemplado en la política nacional del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) establece explícitamente la estructuración de un conjunto de acciones que desde las autoridades regionales (corporaciones autónomas ambientales) se han concentrado en las acciones territoriales educativas formales y no formales, denominadas *cultura del agua* (definidas en el Plan Hídrico Nacional), que pretende mejorar la acción de los ciudadanos con las prácticas cotidianas de uso del recurso hídrico doméstico y productivo. Estos proyectos han ido de la mano de recursos de cofinanciación internacional y regional, con apoyo en una acción pedagógica y de sensibilización en los niveles básicos de formación primaria, secundaria y ciudadana. Dentro de estos proyectos se han conformado grupos apalancados por el SINA, como el caso de Jóvenes por el Ambiente y Jóvenes Pregoneros del agua, que se ha venido fortaleciendo con el apoyo de las CAR y el seguimiento y evaluación del Ministerio de Educación Nacional.

En la última década se han venido realizando encuentros nacionales y regionales, en los cuales se dan los intercambios de experiencias de los proyectos escolares y las iniciativas académicas que generalmente van acompañadas de los procesos de coevaluación y miradas de expertos desde la academia. Una parte importante de su articulación tiene directa relación con la planificación de proyectos ambientales en contexto, como los exigidos en el modelo de educación ambiental colombiano denominados PRAES (Proyectos Ambientales Escolares) y la gestión ambiental con participación ciudadana definida en los Comités Técnicos Interinstitucional de Educación Ambiental (CIDEA). Estas tareas, coordinadas de manera conjunta en cabeza de las corporaciones regionales ambientales y secretarías técnicas en las grandes ciudades, apuntan a ser la base de cambio ambiental desde el enfoque educativo y de participación social.

La educación superior y el tema del agua como eje de discusión académica

La educación ambiental como proceso transversal en la formación universitaria está dada, en parte, por los compromisos socioambientales adquiridos con las prácticas de sostenibilidad, con las que en muchas ocasiones las instituciones de educación superior asumen retos propios frente a las tendencias globales en relación con los problemas ambientales y sus alternativas de manejo como un amplio espacio de

intervención. En la mayoría de los casos, las universidades en sus procesos de calidad incorporan prácticas operacionales que pueden transformar su relación con los recursos naturales con los que se relacionan directamente. En cada contexto institucional las prioridades cambiarán en el modelo de gestión ambiental propuesto. Algunos de estos principios se comparten en redes de trabajo de intercambio de experiencias en ambientalización universitaria como la Red de Indicadores de Sostenibilidad de las Universidades (RISU) y Red Ambiental de Universidades Sostenibles (RAUS) en Latinoamérica y Colombia, respectivamente, donde el tema de las prácticas de uso y manejo sostenible del agua está inserto.

En cuanto al tema del agua como eje de transformación y motivación de investigación, este panorama puede ser tan amplio y complejo como universidades y programas académicos hay en el mundo. Varios tipos de proyectos como los de infraestructura hidráulica e hidroeléctrica, en la ingeniería, han dado paso a crear espacios de intercambio nacional e internacional de tipo académico e institucional. Estos buscan fortalecer capacidades tecnológicas para resolver problemas compartidos acerca del agua con las instituciones de carácter superior y organismos multilaterales que apoyan la gestión. Muchos de estos procesos han permitido dar paso a la configuración de especialidades de conocimiento en programas posgraduales de diferente tipo. Sin embargo, no es tan frecuente encontrar una definición y acción académica que contemple el abordaje integral acerca del recurso hídrico, y de esta manera se adapta más su temática a los enfoques de los pensum relacionales en las diferentes ciencias y disciplinas. Eventualmente, se establecen agendas de trabajo articulares a coyunturas temáticas acerca del agua, que hacen predominar los grupos de trabajo y los eventos académicos sectoriales con apoyo, en ocasiones, de las asociaciones profesionales y gremios en los diferentes países (Global Water Partnership [GWP], 2013).

Otras instituciones universitarias han iniciado sus propias agendas con base en la experiencia investigativa y la amplitud de criterio para realizar apuestas formativas en términos de universalización del conocimiento científico de los recursos hídricos, y así han consolidado cátedras magnas para todos los programas académicos con los que se relacionan intra e interinstitucionalmente. Su reconocimiento, participación e impacto han dado paso al apoyo de organismos como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de la Unesco, y que sean vinculadas al esquema internacional al ofertarse como “cátedras del agua”. Para la Unesco la gestión de los recursos hídricos hace parte integral de iniciativas como el Programa Hidrológico Internacional (PHI), que promueve en el Sistema de Naciones Unidas el desarrollo de espacios de intercambio en la gestión sostenible del agua, con base

en la educación, la investigación y el fortalecimiento de capacidades locales y regionales en materia hidrológica.

En su octava fase, este programa de la Unesco (periodo 2014-2021) indica en sus alcances la necesidad de actuar a partir de la investigación en las creencias culturales y actitudes sobre el agua frente a los cambios significativos en el ciclo hidrológico y las necesidades de adaptarse a las problemáticas de la gestión de los recursos hídricos, como en el caso del calentamiento global y los retos por el crecimiento de la población frente a la variación y reducción en la disponibilidad de los recursos hídricos. El PHI se preocupa por el desarrollo de acciones de orden interdisciplinario que contribuya al logro de métodos y herramientas innovadoras en relación con los procesos de las ciencias del agua y sus desafíos. Esto se pretende alcanzar con apoyo de centros y las cátedras del agua. En este sentido, es importante mencionar que las cátedras de la Unesco que tienen que ver con el agua son: desastres relacionados con el agua y los cambios hidrológicos (4 cátedras); el agua subterránea en un medio cambiante (3 cátedras); abordar la escasez y calidad del agua (8 cátedras); el agua y asentamientos humanos en el futuro (2 cátedras); ecohidrología: creación de armonía para un mundo sustentable (12 cátedras); educación y cultura del agua: clave de la seguridad hídrica (4 cátedras); agua y género (4 cátedras); agua y cultura (3 cátedras).

En América Latina, las cátedras del agua con apoyo de la Unesco son: la Cátedra Unesco Agua y Cultura (Uruguay), orientada a la investigación en proyectos interdisciplinarios con enfoque antropológico, Universidad de la República del Uruguay Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación; Cátedra Mujeres y Desarrollo: conducción a formuladores de políticas Públicas de género y raza con equidad en el desarrollo de las ciencias del agua, Comité Nacional Mexicano del Programa Hidrológico Internacional (Conamephi); Cátedra del Agua en la Sociedad del Conocimiento (2008), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; Cátedra Unesco en la Gestión Sostenible del agua, Universidad de San Carlos, Guatemala; Cátedra Unesco sobre Agua, las Mujeres y la Gobernanza, Instituto Global de estudios en ciencias Globales (Iglobo), Santo Domingo, República Dominicana; Cátedra Unesco Agua y Educación para el Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina; Cátedra Unesco Agua y Cultura, Universidad de la República del Uruguay; Cátedra Unesco en Riesgos Hidrometeorológicos, Universidad de las Américas Puebla, México; Cátedra Unesco en Tecnología y Gestión Sostenible del Agua, Universidad de Curazao Dr. Moisés da Costa Gómez, Curazao (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la Naciones Unidas [WWAP], 2016).

El trabajo que adelantan estas universidades e institutos tecnológicos constituye un referente en la importancia de incorporar en otras naciones con abundantes recursos hídricos, como en el caso de Colombia, un agenciamiento educativo y de investigación interdisciplinaria, que contribuya al cambio cultural fundamentado en el conocimiento social y científico frente a los comportamientos adaptativos exigidos por la dinámica de la gestión integral de los recursos hídricos. En este sentido, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas considera la relevancia de consolidar un espacio definible como cátedra del agua, al contar con una base formativa fortalecida en sus grupos de investigación a través de la Red Bacata-IT y los grupos de investigación Progas y Servipúblicos, de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Articulación y funcionamiento de la cátedra del agua, Universidad Distrital

La Cátedra del Agua en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se inicia con un proceso de estudio de las condiciones funcionales de la gestión territorial del recurso hídrico en la región centro de Colombia, que permite identificar avances en las convenientes estrategias locales y regionales por ser apalancadas en un concepto científico, educativo y tecnológico con enfoque en la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH). Adicionalmente, el país favorece un contexto institucional público para la incorporación de propuestas educativas y científicas con respecto a la política pública sectorial. Se apoya en el esquema de desarrollo institucional propuesto desde la Política GIRH y el Plan Hídrico Nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010) en los ejes de fortalecimiento institucional y gobernanza del agua, proceso cultural del agua. Se articula a las iniciativas de las autoridades ambientales y las organizaciones sectoriales del agua, considerando el enfoque de gestión basado en cuencas hidrográficas; además, busca el apoyo en programas de cooperación para el desarrollo, como las iniciativas regionales de los organismos multilaterales regionales a nivel Latinoamérica y el respaldo de diferentes redes académicas nacionales e internacionales

Antecedentes

La iniciativa de un espacio integral que facilite el encuentro con los actores del agua en los territorios ha estado presente en diferentes lugares del mundo, como en el caso de los 40 programas apoyados por la Unesco denominados “cátedra del agua” que han apalancado con la presencia de la academia en la construcción de dichos espacios. En el orden suprarregional, la Comunidad Andina de Naciones posee

la Estrategia Andina para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, con base en gestión del conocimiento en el marco de la educación formal e informal. A nivel nacional, en la actualidad se encuentran iniciativas estructuradas como la Cátedra del Agua del Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), que reúne a profesionales e instituciones alrededor del uso eficiente del agua.

De igual manera, las corporaciones autónomas regionales y secretarías técnicas ambientales (en las grandes ciudades) desarrollan diferentes programas, en el marco del Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR), vinculados a la GIRH, en un contexto como el ofrecido en los Planes de Ordenamiento del Recurso hídrico (PORH) y los planes de Ordenación y Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas, así como el seguimiento y desarrollo a los Proyectos Ciudadanos de Educación ambiental (Procedas), Programa de Uso Eficiente y ahorro del Agua (PUEAA), Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), entre otros, que incorporan acciones articulares con municipios, empresas y particulares que requieren apoyo en el conocimiento tecnológico, normativo e institucional. Esto permite abrir espacios de participación para la presencia de instituciones como las universidades y centros de desarrollo científico, a partir de acuerdos de cooperación y financiación de proyectos estratégicos.

Estructura para su agenciamiento

Considerando la participación de los diferentes actores públicos y privados en el orden nacional en Colombia, relacionados con la gestión del agua, el colectivo de trabajo ha fijado una meta inicial en el desarrollo del programa con logro de alianzas y apoyos en relación con:

- Identificación de los grupos de interés respecto a la GIRH (grupos de investigación internos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas); trayectorias y experiencias.
- Definición de campos de actuación con base en prioridades territoriales (espacios de intervención posibles), establecidos en las agendas locales de los planes de desarrollo.
- Establecimiento de alianzas estratégicas para el logro de sinergias interinstitucionales en relación con programas y proyectos articulares a la GIRH, que requieran apoyo y participación social con interés educativo.
- Creación de una base de consulta referencial a programas, experiencias e iniciativas locales en torno al uso sostenible del agua.

- Construcción de una caja de herramientas para la transferencia relacionadas con tecnologías apropiadas para el uso eficiente del agua en sectores rurales y suburbanos.
- Revisión de los alcances programáticos de las estructuras de planificación ambiental territorial, que permiten el desarrollo de proyectos articulares vinculantes a la GIRH.
- Establecimiento de áreas piloto para el desarrollo del espacio educativo con núcleos escolares rurales y asociaciones de usuarios de acueductos veredales.

Organización funcional de la Cátedra del Agua en la Universidad Distrital

Para el alcance de la consolidación de los proyectos formativos se ha establecido una estructura basada en grupos de trabajo funcional y en los programas operativos, como se indica a continuación.

Transferencia tecnológica: constituida por la identificación, sistematización y guía en el uso de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento y la conservación sostenible del recurso hídrico, que son compartidas con comunidades y grupos de interés local en la región centro del país y en espacial en los sectores rurales.

Educación: orientado a la formación e investigación de las prácticas pedagógicas y didácticas en el conocimiento de los recursos hídricos, en los diferentes niveles educativos. Consolidación del foro y espacio académico abierto para la comunidad universitaria y los grupos de interés: Cátedra del Agua en la Universidad Distrital.

Comunicación y divulgación: grupo de trabajo orientado a la creación y sistematización de las piezas comunicativas, que originan las prácticas en la gestión integral de los recursos hídricos y la multiplicación de las experiencias interdisciplinarias de los grupos de investigación que participan de la cátedra, dentro de la proyección social del programa.

Cooperación interinstitucional: con el apoyo de la estructura de extensión de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, así como del Sistema de Información de Extensión (Idexud), Centro de Relaciones Interinstitucionales (CERI) e Instituto para la Pedagogía, la Paz y el Conflicto Urbano (Ipazud) (centros de orden institucional de la Universidad Distrital), se busca establecer la base de convenios y acuerdos de conveniencia que permitan la sostenibilidad del proceso con relación a cooperación, financiación y promoción.

Desarrollo institucional territorial: basado en la acción de los grupos de investigación en la observación de los indicadores de gestión hídrica territorial y el seguimiento a procesos cooperados con agentes regionales y locales, que tienen injerencia en la toma de decisiones con respecto al manejo del recurso hídrico; incluye el acompañamiento interinstitucional a Gobiernos locales en la gestión del agua.

Figura 1. Esquema articular de la Cátedra del Agua en la Universidad Distrital



Fuente: elaboración propia.

Logros y perspectivas

Actualmente, el proceso de institucionalización de la Cátedra del Agua en la Universidad Distrital ha venido adelantando una serie de proyectos que consolidan su portafolio educativo; algunas de estas actividades corresponden a la promoción del espacio académico, en su articulación con los grupos de investigación intrafacultades. De igual manera, con apoyo en estudiantes de maestría se viene adelantando un conjunto de investigaciones en relación con las percepciones en el mundo escolar rural en la enseñanza de la problemática hídrica y sus abordajes para sus soluciones. Se ha promocionado en eventos y foros nacionales la existencia de un portafolio de trabajo y se hace su presentación oficial a través del evento Ciaya IV.

Se agencia la participación internacional cooperada con otras universidades en América Latina, en la República Argentina y en México, donde existe una experiencia en cátedras del agua con apoyo de la Unesco, y con esto la compartición de experiencias permitirá avanzar en este enfoque de internacionalización.

Referencias

- Congreso de la República de Colombia (1993). “Ley 99 de 1993”. Diario Oficial, Sistema Nacional Ambiental. Bogotá. Colombia.
- II Foro Mundial del Agua. (2000). *Declaración ministerial sobre seguridad del agua de La Haya*. La Haya.
- Global Water Partnership (GWP). (2013). *Lighthouse case Study. Global Solution Networks*. Recuperado de <http://gsnetworks.org/wp-content/uploads/2013/12/CS-Global-Water-Partnership.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). *Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico Viceministerio de Ambiente. Dirección de Ecosistemas*. Grupo de Recurso Hídrico República de Colombia. Documento institucional.
- Peña, H. (2016). *Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- 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*. París: Unesco.

Capítulo 6

Los indicadores y la gestión socioambiental como instrumentos en la construcción de política pública

FERNANDO SÁNCHEZ SÁNCHEZ*

Introducción

Un indicador es

[...] una observación empírica o estimación estadística que sintetiza aspectos de uno o más fenómenos que resultan importantes para uno o más propósitos analíticos y de monitoreo en el tiempo. Si bien el término indicador puede aludir a cualquier característica observable de un fenómeno, suele aplicarse a aquellas que son susceptibles de expresión numérica y que son pertinentes o de máxima importancia para el interés público. (Quiroga, 2009, p. 47)

Dentro de las características que deben tener los indicadores se encuentran la precisión y coherencia con el tema de análisis, la flexibilidad a los cambios, la confiabilidad, la sencillez para lograrlos y la capacidad prospectiva. Ante el estudio de un fenómeno determinado, los indicadores permiten conocer su magnitud, intensidad, evolución, efectos y pronóstico (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal] y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2004).

* Doctor en Gerencia Pública y Política Social. Docente investigador, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: fersasanchezphd01@gmail.com

La importancia de los indicadores radica en que permiten medir los cambios de una situación a través del tiempo, analizar los resultados de las iniciativas planteadas, evaluar los procesos de desarrollo y orientar el logro de mejores resultados. Los principales criterios que se utilizan para construir indicadores son la mensurabilidad, el análisis y la relevancia (Cepal y PNUD, 2004).

Es importante seleccionar un conjunto apropiado de indicadores que cubran aspectos cruciales difíciles de ver a simple vista y las relaciones sinérgicas o de competencia que puedan existir (von Wirén-Lehr, 2001). Sin embargo, estos indicadores no pueden ser demasiados porque representarían costos inmanejables y resultados y conclusiones redundantes e incomprensibles (Van Cauwenbergh, Biala, Bielders, Brouckaert et al., 2006, Bossel, 2001).

Bell y Morse (2003) destacan la gran diferencia que existe del número de indicadores que se deben seleccionar en la interpretación de los componentes medio ambientales (aire, agua y suelo), para que resulten apropiados, y aunque por lo general se utilizan entre 10 y 20 (Astier y Hollands, 2007; Masera y López-Ridaura, 2000; Speelman y López-Ridaura, 2007), lo vital es que los indicadores seleccionados proporcionen información sobre los atributos de sustentabilidad y los procesos relevantes del sistema por evaluar.

Indicadores ambientales

El uso de los indicadores ambientales se ha extendido alrededor del mundo y su definición varía de acuerdo con la institución que los utilice y con los objetivos que persiga.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2016), un indicador ambiental es un valor derivado de parámetros, que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del asociado con el valor del parámetro en sí mismo.

Para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, según la Resolución 0667 del 27 de abril de 2016, un indicador ambiental está orientado a monitorear los cambios en la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables y el medio ambiente, y la presión que se ejerce sobre ellos debido a su uso y aprovechamiento.

Respecto a la responsabilidad en la implementación de los indicadores ambientales en Colombia, esta resolución establece que a nivel nacional los entes encargados son el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y los institutos de investigación ambiental vinculados. A nivel regional, la

competencia es de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR). El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ideam, en coordinación con los institutos de investigación ambiental vinculados, es el encargado de definir los lineamientos técnicos correspondientes.

La Resolución 0667 del 27 de abril de 2016 establece una serie de indicadores mínimos, conformados por variables que permiten registrar hechos y describir comportamientos para realizar el seguimiento al estado del medio ambiente y al impacto de la intervención institucional.

Los indicadores mínimos, divididos en desarrollo sostenible, ambientales y de gestión, son de obligatorio reporte por parte de las CAR, con una periodicidad semestral y anual.

Los siguientes indicadores corresponden a los indicadores ambientales mínimos en Colombia, ordenados de acuerdo con los objetivos de desarrollo sostenible.

Indicadores para consolidar las acciones orientadas a la conservación del patrimonio natural

1. Número de hectáreas de ecosistemas naturales en jurisdicción de las corporaciones (bosques naturales, páramos y humedales).
2. Tipos de ecosistemas en la jurisdicción de las corporaciones.
3. Número de especies amenazadas.
4. Índice de fragmentación de bosques.
5. Tasa promedio anual de deforestación.
6. Índice de conservación de suelos.

Indicadores para disminuir el riesgo por desabastecimiento de agua

1. Caudal mínimo anual de la corriente en cada bocatoma de acueductos en centros poblados, medido en litros por segundo (l/seg).
2. Índice de calidad de agua en la corriente, aguas arriba de las bocatomas de cabeceras municipales.
3. Consumo de agua per cápita (residencial), medido en litros por habitante por día, (l/hab./día).

4. Número de hectáreas de cobertura boscosa en cuencas abastecedoras de acueductos.

Indicadores para racionalizar y optimizar el consumo de recursos naturales renovables

1. Porcentaje de energía consumida de fuentes renovables con respecto al total de energía consumida.
2. Consumo de agua por unidad de producción (industrial y comercial).
3. Consumo de agua en el sector agrícola (por hectárea) y pecuario (por cabeza).

Indicadores para generar empleos o ingresos por el uso sostenible de la biodiversidad y sistemas de producción sostenible

1. Número de especies de fauna y flora vinculadas a procesos de mercados verdes.
2. Toneladas de residuos sólidos aprovechados.
3. Número de empresas, grupos asociativos y comunidades organizadas, dedicadas a mercados verdes.

Indicadores para reducir los efectos en la salud asociados a problemas ambientales

1. Índice de calidad de aire en las localidades de especial interés por contaminación atmosférica.
2. Concentración de agentes patógenos entéricos en cada bocatoma de acueductos en centros poblados.
3. Accesibilidad a agua potable para consumo humano.
4. Disponibilidad efectiva de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.
5. Toneladas de residuos sólidos dispuestos inadecuadamente.

Indicadores para disminuir la población en riesgo asociado a fenómenos naturales

1. Población localizada en áreas susceptibles de inundación.
2. Población localizada en áreas susceptibles a deslizamientos.
3. Número de hectáreas susceptibles a afectación por incendios forestales.

Indicadores sociales

Según la OCDE (1981), un indicador social es una medida estadística que permite observar el nivel de una preocupación social fundamental y sus variaciones en el tiempo.

Para Simone Cecchini (2005), los indicadores sociales son instrumentos analíticos que permiten mejorar el conocimiento de los distintos aspectos de la vida social y de los cambios que ocurren de manera continua; gracias a la información que brindan, ayudan a solucionar problemas sociales y a construir políticas públicas sustentadas en la evidencia empírica.

Dentro de la tipología de los indicadores sociales, que destaca Cecchini, se encuentran los descritos a continuación.

Indicadores de hechos y de percepciones

Los indicadores de hechos intentan mostrar la condición de un fenómeno social o sus cambios en el tiempo; por su parte, los indicadores de percepciones tratan de manifestar la concepción que tiene un público objetivo acerca de una condición específica. Se debe tener en cuenta que los indicadores son aproximaciones a la realidad y, por esta razón, no son ideológicamente neutros.

Indicadores cuantitativos y cualitativos

Los indicadores cuantitativos proceden de información en formato numérico o en categorías precodificadas, se basan en la selección aleatoria de las unidades o en la selección de todas las unidades en un área determinada.

Por su parte, los indicadores cualitativos provienen de textos descriptivos sin, o con poca, categorización y sin precodificación. La selección del método de muestreo varía según el objetivo de estudio, y en ocasiones no existe un claro procedimiento de selección.

Indicadores absolutos y relativos

Los indicadores pueden expresarse en términos absolutos de medición, o derivados mediante un proceso de cálculo que relacione la medición con otras magnitudes. La expresión de los indicadores en términos relativos facilita la comparación entre países. Los indicadores absolutos pueden construir indicadores específicos aplicables a distintas áreas de interés.

Indicadores simples y compuestos

Los indicadores simples son series de datos básicos que analizan algún aspecto determinado de las condiciones de vida; las cifras resultantes se refieren a una sola variable, por ejemplo, tasa de crecimiento poblacional.

Los indicadores compuestos o índices representan tendencias en el bienestar o los servicios sociales que incluyen diversos aspectos. Las cifras resultantes de estos indicadores se refieren a más de una variable, por ejemplo, el Índice de Desarrollo Humano (IDH) del PNUD).

Indicadores intermedios y finales

Los indicadores intermedios son aquellos que miden los factores que propician la consecución de un objetivo de carácter social. Existen indicadores intermedios causales y de producto, que no son objetivos en sí mismos, pero ayudan a conseguir los objetivos seleccionados.

Por otro lado, los indicadores finales miden el efecto de una intervención en el bienestar de los individuos; además, pueden ser divididos en indicadores de “resultado” y “de impacto”. Los primeros miden el acceso, el uso y la satisfacción con los servicios públicos que en sí no son dimensiones del bienestar. Los indicadores de impacto miden las dimensiones esenciales del bienestar.

Indicadores de eficacia y eficiencia

En la evaluación de programas y proyectos se encuentran los indicadores de eficacia y de eficiencia. Los indicadores de eficacia miden el grado con el cual una política o programa social es capaz de alcanzar las metas y objetivos definidos, en el tiempo previsto y con la calidad esperada, pero sin tener en cuenta los costos.

Los indicadores de eficiencia miden la relación entre productos obtenidos y costos.

Según Cecchini (2005), las características deseables que deben tener los indicadores sociales para monitorear metas de desarrollo en el ámbito de proyectos y programas son:

- **Precisión:** los indicadores deben medir de manera directa, inequívoca y exacta los fenómenos para los cuales han sido elegidos. La exactitud es la proximidad entre el valor final estimado y el verdadero valor poblacional desconocido.
- **Mensurabilidad:** los indicadores deben fundar su cálculo en datos básicos disponibles, cuya obtención se pueda repetir sin dificultad en el futuro.
- **Relevancia:** los indicadores deben ser útiles para dar respuestas pertinentes a interrogantes y preocupaciones políticas fundamentales.
- **Facilidad de interpretación:** los indicadores no deben generar ambigüedades respecto de la interpretación para las políticas públicas.
- **Fiabilidad:** los indicadores deben arrojar las mismas conclusiones de forma repetida o a partir de diversas fuentes.
- **Pertinencia y puntualidad:** los indicadores tienen que generarse con una frecuencia y puntualidad suficientes para poder supervisar las políticas públicas.
- **Economía:** la utilidad de los indicadores debe ser satisfactoria en relación con el tiempo y el dinero empleados para su construcción y aplicación.
- **Accesibilidad:** los datos y los metadatos de los indicadores deben estar disponibles de manera clara y contar con un apoyo especializado.
- **Comparabilidad:** los indicadores deben permitir comparaciones entre distintos países, áreas geográficas, grupos socioeconómicos y años.

La Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), en su informe Colombia *Balance 2016 y perspectivas 2017*, presenta el avance importante que han tenido los indicadores sociales en los últimos años.

La tasa de pobreza disminuyó alrededor de 22 puntos en la última década, y alcanzó valores de 27,8 % en 2015, a diferencia de 2002, cuando esta cifra ascendía a casi un 50 % de la población. Es importante destacar que el porcentaje de la población por debajo de la línea de pobreza para las 13 ciudades logró por tercer año consecutivo, niveles inferiores al 18 %, y se llegó a un 15,4 %. (p. 45)

La población por debajo de la línea de pobreza extrema actualmente es de 7,9%; así, por segundo año consecutivo se situó en niveles inferiores al 10%; hace 13 años este indicador se acercaba al 20%. Si bien la desigualdad ha disminuido en los últimos años, aún permanecemos en niveles altos. El coeficiente de Gini para el 2015 se ubicó en 0,522, lo cual mejoró la tendencia estable que se mantenía desde el 2012. (p. 53)

Ante este panorama resulta vital destacar la postura de González (2000), en la que afirma que no se puede establecer una diferencia legítima entre política social y política económica, debido a la dimensión ética que comparten; las variables macroeconómicas tienen impacto directo en el bienestar social de la población. Por esta razón, los indicadores sociales no son una manera de juzgar la política social, pero sí pueden evaluar el impacto que tiene la política económica en el bienestar de la sociedad, por lo que su medición resulta fundamental para el desarrollo humano.

González (2000) resalta la importancia de mejorar continuamente los indicadores sociales y de entender que van más allá del concepto que representan. Temas como el bienestar y la pobreza responden a realidades muy complejas, que escapan a cualquier indicador, por lo que su medición siempre será una aproximación lejana del concepto que representan. El poder informativo de los indicadores responde al concepto previo de su construcción, base de su libertad interpretativa, en una realidad intuitivamente clara. La sencillez interpretativa facilita la asimilación de los indicadores sociales por parte de la comunidad y representa la posibilidad de incidir en las decisiones de política pública.

Indicadores de gestión socioambiental

En el proyecto de *Evaluación social de la gestión ambiental* Cepal/PNUD COL/01/002 se resalta cómo los investigadores simplifican, cuantifican, analizan y comunican temas complejos a la sociedad mediante la elaboración y el uso de indicadores. De esta manera, las estrategias y acciones relacionadas con el desarrollo y el medio ambiente se plantean desde un panorama más claro, que permite identificar prioridades, realizar seguimiento a las acciones definidas y evaluar avances relacionados con los objetivos propuestos, que buscan alcanzar transformaciones, sociales, económicas y ambientales.

La gestión socioambiental, encaminada al desarrollo de procesos sustentables, integra indicadores puramente ambientales, de carácter físico o biológico, con indicadores sociales; esto con el objetivo de preservar el medio ambiente y aumentar la calidad de vida humana de forma sostenida (Dixon y Fallón, 1991). Los indicadores socioambientales permiten analizar las interacciones entre el medio social y el

medio físico biológico, orientando la toma de decisiones razonables respecto al uso de los recursos naturales para satisfacer necesidades socioeconómicas y políticas.

Los indicadores socioambientales describen el comportamiento de las variables fundamentales para comprender la relación intervención-medio ambiente. Serán dinámicos, al describir la presión ejercida por un grupo humano, y estáticos, al describir el resultado de esa presión sobre un determinado medio.

A partir de la publicación del *Informe Brundtland* y de la Agenda 21 (WCED, 1987), empezó a crecer de manera exponencial el análisis de los indicadores de sustentabilidad, y aunque a través del tiempo su uso en las evaluaciones de sustentabilidad ha sido heterogéneo, sus características de coherencia y de sentido colectivo han resultado vitales. Se considera necesario el desarrollo de marcos estructurados, que relacionen los atributos generales de los sistemas dinámicos con indicadores específicos para cada contexto socioambiental, en escalas de tiempo y espacio predefinidas. Se utilizan enfoques jerárquicos y sistémicos para seleccionar indicadores de manera rigurosa, incluyendo procesos participativos (Maser et al., 1999; Peterson, Beard Jr., Beisner, Bennett et al., 2003).

De acuerdo con Quiroga (2001), los indicadores de sustentabilidad incluyen el conjunto de valores y metas evocados en el concepto de sustentabilidad y de ahí radica su importancia en variables que se puedan medir a nivel local. En palabras de Giampietro (1997), los indicadores de sustentabilidad son herramientas que se utilizan para simplificar la descripción de un sistema, promueven comunicación entre los agentes que intervienen y construyen consensos.

Es necesario resaltar que no existe una lista de indicadores universales porque los indicadores responden a los procesos de los que hacen parte, los que pueden ser apropiados para un sistema, pueden ser inapropiados para otro (Bakkes, van den Born, Helder, Swart et al., 1994). Las características del problema de estudio, la escala del proyecto, el grado de acceso y la disponibilidad de datos son elementos que intervienen en el diseño y la selección de indicadores. Los indicadores seleccionados deben responder a los objetivos de la evaluación.

Los indicadores no pueden verse como elementos aislados, sino como elementos que constituyen un sistema de información, una herramienta adecuada para facilitar el desarrollo de las relaciones sociedad-ambiente, dentro del proceso de interacción presión y su relación con el estado de lo medido, que se da entre ambas dimensiones (Cepal y PNUD, 2004).

El modelo presión-Estado-respuesta (PER), desarrollado en 1970 por el analista canadiense Anthony Friend y posteriormente adoptado por la OCDE para

la medición y reporte del estado del medio ambiente, surge de la idea de que tanto la presión de los grupos humanos sobre el medio ambiente, como la de las variables ambientales sobre estos grupos determinan un estado de las variables sociales y ambientales, el cual exige una intervención o respuesta a cargo de las autoridades responsables de la gestión ambiental.

El primer paso para el desarrollo del modelo PER es la construcción de un marco conceptual que ayude a estructurar la información ambiental de una manera sencilla y accesible, que facilite la toma de decisiones. Este marco conceptual debe responder a las siguientes preguntas: ¿qué le está pasando al ambiente o al recurso natural de análisis? ¿Por qué está ocurriendo esta situación? ¿Qué se está haciendo al respecto?

La primera pregunta se responde mediante indicadores de cambio de estado o tendencia biológica o física del ambiente. Estos indicadores muestran la calidad ambiental y la situación de los recursos naturales a través del tiempo; además, evidencian la salud de la población y de los ecosistemas en su interrelación con las actividades humanas. Para conocer la razón que origina la situación de análisis se utilizan los indicadores de estrés correspondientes a aquellos elementos que ejercen algún tipo de presión sobre las condiciones del medioambiente o de los recursos naturales. La clasificación de su naturaleza es de vital importancia para plantear las acciones de atención.

Finalmente, la pregunta ¿qué se está haciendo al respecto para la definición de esos factores? se resolverá a través de indicadores de respuesta, relacionados con las medidas políticas adoptadas para solucionar el problema planteado. Estos indicadores que son herramientas fundamentales para alcanzar la sustentabilidad planteada en los planes de desarrollo local no siempre tienen naturaleza cuantitativa, y en ciertas ocasiones requieren estudios de percepción social para su evaluación.

Un monitoreo debe articular canales de comunicación, discusión y negociación para la revisión de proyectos, y mecanismos que permitan la adopción de las medidas necesarias para alcanzar los objetivos planteados. Ofrece información oportuna de fuentes directas e involucra sistemáticamente los puntos de vista de los actores que intervienen (Cepal y PNUD, 2004).

El seguimiento y la evaluación se pueden realizar desde un enfoque objetivo o subjetivo; el primero se basa en las observaciones y los registros efectuados por el monitor, sin tener en cuenta las percepciones de las demás personas. El segundo, por el contrario, se basa en las percepciones de las personas que intervienen en el proyecto, al considerar que proporcionan una visión más exacta que la pueden brindar las observaciones objetivas de un agente externo (Cepal y PNUD, 2004).

Dentro de los principales criterios que se utilizan para el seguimiento de procesos y resultados, y para la evaluación se encuentran la existencia, pertinencia, integralidad, coherencia, calidad, celeridad, oportunidad, transparencia, confiabilidad y participación. Los criterios de evaluación se enfocan en el impacto que tienen los planes, programas y proyectos sobre los grupos sociales-público objetivo (Cepal y PNUD, 2004).

Los indicadores de cumplimiento son los que permiten seguir el desarrollo del proceso mediante el monitoreo de las metas parciales trazadas. Dentro de los indicadores de evaluación, encontramos los indicadores de efecto, que miden el cumplimiento de los objetivos específicos y los indicadores de impacto, los cuales miden el de los objetivos generales (Cepal y PNUD, 2004).

Participación ciudadana en la construcción y aplicación de los indicadores socioambientales

La participación ciudadana resulta fundamental en la construcción y aplicación de los indicadores socioambientales; las comunidades deben apropiarse de su entorno y de las acciones dirigidas a mejorar sus condiciones ambientales. Es necesario informar y promover la participación de la gente en la identificación de las variables socioambientales que afectan sus condiciones de vida, en la comprensión de los indicadores que se construyan para realizarles seguimiento y evaluación, y en la aplicación y veeduría de acuerdo con los mandatos legales (Cepal y PNUD, 2004).

Metodología

Para el desarrollo de este tipo de proyectos se tomaron en cuenta 24 fuentes bibliográficas relacionadas con su ejecución, y se manejaron indicadores sociales, ambientales y de gestión social. Se consultaron las páginas oficiales de las entidades encargadas del desarrollo económico, social y ambiental a nivel mundial y en nacional.

Resultados

Para entender la importancia de los indicadores en la gestión socioambiental, es necesario conocer la función de estos, sus características principales y sus procesos de construcción, aplicación y evaluación.

Es fundamental comprender que los indicadores sociales van más allá del concepto que representan, pues responden a realidades muy complejas y su medición siempre será una aproximación lejana de estas. Además, los indicadores deben ser

fáciles de interpretar para que la comunidad participe en su construcción, aplicación y evaluación, y de esta manera pueda incidir en las decisiones de política pública.

Hay definiciones que no son claramente estructuradas al momento de formular los indicadores y, sobre todo, se presenta confusiones, bajo esas condiciones en su aplicación y posterior interpretación. Este trabajo requiere personal profesional altamente calificado que tenga la experticia necesaria para hacer una adecuada integración entre los indicadores económicos, sociales y ambientales.

Esa relación de interpretación debe estar definida por lo que se quiere medir; así, lo ambiental, lo social y lo económico son conducentes a la tipología del proyecto y especialmente en cómo se hace una variabilidad, interrelación e interdisciplinariedad en la interpretación de los resultados de los indicadores. Pero lo más importante es lograr de manera coordinada la correlación de las diferentes variables con que cuentan los indicadores utilizados, los cuales posteriormente serán plasmados de manera cotidiana dentro de los índices de gestión del proyecto, que serán los que nos permitirán tomar decisiones de tipo gerencial.

Todo lo anterior nos permite encontrar la importancia con que cuentan estos indicadores, pues sin ellos cualquier tipo de proyecto carecerá de seguimiento, de evidencias, de trazabilidad, y sería entonces difícil y aleatorio poder tomar decisiones desde la teoría de la complejidad que nos lleven a encontrar las mejores alternativas frente a los escenarios propuestos.

Consideraciones finales

Aunque Colombia presente avances importantes en sus indicadores en los últimos años, no se puede hablar de un desarrollo real con las cifras de desigualdad social que se tienen. Se debe reconocer que la medición de los indicadores es solo una aproximación lejana de las realidades complejas por las que atraviesa nuestra sociedad en sus diferentes sectores.

Independientemente de los avances que se obtengan, es vital el mejoramiento continuo de los indicadores de gestión socioambiental, con la participación de la comunidad en su construcción, aplicación y evaluación, para alcanzar un fortalecimiento en las políticas públicas que generen bienestar ambiental y social.

Estas consideraciones nos permiten ver lo importante que resulta para el país en general fortalecer el concepto socioambiental, y más si se toma en consideración que todas las entidades del Estado, sin excepción, deben fortalecer alrededor de los instrumentos de gestión en todas sus dimensiones. Sin información no hay segui-

miento, sin indicadores no hay elementos verificables, sin índices no hay históricos, sin interpretación de información veraz no hay alternativas de solución. En ese sentido, en el campo de análisis que da origen a este capítulo no sería viable fortalecer ningún proyecto conducente al mejoramiento de la calidad de vida y bienestar sin una adecuada formulación, aplicación, interpretación, seguimiento y retroalimentación de los indicadores de gestión socioambiental.

Referencias

- Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (2016). *Colombia: Balance 2016 y Perspectivas 2017*. Bogotá: autor.
- Astier, M., y J. Hollands (Eds.). (2007). *Sustentabilidad y campesinado: seis experiencias agroecológicas en Latinoamérica* (2da. Ed). Ciudad de México: Mundi-Prensa.
- Astier, M., Masera, O. y Galván, Y. (Coords.). *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. Madrid: Sociedad Española de Agricultura.
- Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) (2008). *El desarrollo de los factores de medición cuantitativos y cualitativos*. Valencia: Nuevo Mundo.
- Bakkes, J.A., van den Born, G. J., Helder, J. C., Swart, R. J. *et al.* (1994). *An Overview of Environmental Indicators: State of the Art and Perspectives*. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP), RIVM.
- Bell, S. y Morse, S. (2003). *Measuring Sustainability. Learning from Doing*. Londres: Earthscan.
- Bossel, H. (2001). Assessing Viability and Sustainability: a Systems – Based Approach for Deriving Comprehensive Indicator Sets. *Conservation Ecology*, 5(2), 12. Recuperado de <http://www.consecol.org/vol5/iss2/art12/>
- Cecchini, S. (2005). *Indicadores sociales en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2004). *Diseño de un sistema de indicadores socioambientales para el Distrito Capital de Bogotá*. Bogotá: autores.
- Dixon, J.A. y Fallon, L.A. (1991). El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcance y utilidad en la formulación de políticas. En J. Vidal (Comp.), *Desarrollo y medio ambiente* (pp. 79-85). Santiago de Chile: Corporación de Estudios para Latinoamérica (Cieplan).
- Giampietro, M., (1997). Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 65, 201-229.

- González, J. (2000). Política social e indicadores sociales en Colombia: una evaluación. *Investigación & Desarrollo*, (3), 83-85.
- Masera, O. R., Astier, M. y López-Ridaura, S. (1999). *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS*. Ciudad de México: Mundi-Prensa.
- Masera, O. R., y S. López-Ridaura. (2000). *Sustentabilidad y sistemas campesinos: cinco experiencias de evaluación en el México rural*. Ciudad de México, Edit UNAM.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2016). “Resolución 0667 del 27”. Bogotá, Colombia.
- Naciones Unidas. (1992). Agenda 21. En *United Nations Conference on Environment and Development (UNCED)*. Conches, Switzerland.
- Naciones Unidas. (1987). *Informe Our Common Future: Brundtland Report*. New York: Nuevo Mundo.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (1981). *Modelo de indicadores para el desarrollo*. New York: Pearson.
- Peterson, G. D., Beard Jr., T. D., Beisner, B. E., Bennett, E. M. et al. (2003). Assessing Future Ecosystem Services: A Case Study of the Northern Highlands Lake District, Wisconsin. *Conservation Ecology*, (3), 73-75.
- Quiroga, R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal).
- Quiroga, R. M. (2001). *Indicadores de sostenibilidad ambiental y desarrollo sostenible: estado, del arte y perspectivas*. Buenos Aires: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), Naciones Unidas.
- Smith, W. (2002). Developing indicators of ‘sustainability’. En I. R. Bowler y C. Cocklin (Eds.), *The sustainability of rural systems. Geographical interpretations* (pp. 75-77). Londres: Kluwer.
- Speelman, E. N., López-Ridaura, S., Alianza, C. N., Astier, M. y Masera, O. (2007). Ten years of Sustainability Evaluation using the MESMIS Framework: Lessons Learned from its Application in 28 Latin American Case Studies. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 14, 345-361.
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Bienders, C., Brouckaert, V. et al. (2006). SAFE. A Hierarchical Framework for Assessing the Sustainability of Agricultural Systems. *Agriculture, Ecosystems Environment*, (120), 229-242.
- Von Wirén-Lehr, S. (2001). Sustainability in Agriculture: An evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, (84), 115-129.

Autores

Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby

Doctora en Ciencias Técnicas del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba; magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes e Ingeniera Civil de la Universidad de La Salle, Colombia. Miembro activo de los grupos de investigación Progas y Servipúblicos; directora de varios proyectos de investigación sobre recurso hídrico, algunos de ellos desarrollados para el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ponente en eventos de carácter nacional e internacional y autora de algunos libros y de varios artículos en revistas nacionales e internacionales al igual que de varios libros. Actualmente es docente investigadora de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia, y coordinadora de la Unidad de Investigaciones de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Carlos Enrique Castro Méndez

Agrólogo de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, especialista de Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomas de Aquino, magíster en Geografía del Convenio Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Actualmente adelanta estudio de doctorado en Geografía. Es investigador en temas de geografía histórico-cultural y caudales ambientales; además, es participante activo en grupos multidisciplinarios con enfoque holístico. Es par evaluador del Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, ponente en varios eventos de carácter nacional e internacional y autor de varios artículos en revistas nacionales e internacionales; miembro del Grupo de Investigación Progas-GAIA de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Fernando Sánchez Sánchez

Ingeniero Ambiental, Administrador Público, especialista en Proyectos de Desarrollo, magíster en Ambiente y Desarrollo, doctor en Ciencias Técnicas y en Políticas Públicas. Ha publicado varios libros de desarrollo sostenible y competitividad ambiental. Es presidente ejecutivo de la Sociedad Iberoamericana de Medio Ambiente, ponente en varios eventos de carácter nacional e internacional, miembro activo de los grupos de investigación Servipúblicos de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Actualmente es docente investigador de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital.

Juan Carlos Alarcón-Hincapié

Ingeniero Catastral y Geodesta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y especialista en Sistemas de Información Geográfica de la misma universidad; magíster en Medio Ambiente y Desarrollo de la Universidad Nacional de Colombia y doctor en Geografía de la misma universidad. Docente titular de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con amplia experiencia en el diagnóstico y aporte de criterios técnico-científicos para la zonificación y el ordenamiento territorial ambiental del país. Línea de investigación Cambio Climático y Ordenamiento Territorial. Actualmente es profesor en la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital.

Helmut Espinosa García

Ingeniero Forestal, especialista en Planificación del Desarrollo y Msc. en Desarrollo Rural. Docente investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y director del grupo de investigación Progasp-GAIA.

Mario Guadalupe González Pérez

Ingeniero Civil, maestro en Ingeniería con especialidad en Administración de la Universidad Nacional Autónoma de México y doctor en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad. Actualmente, está adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá, e imparte cátedra en la Maestría en Agua y Energía, el Doctorado en Geografía y Ordenamiento Territorial y el Doctorado en Movilidad Urbana, Transporte y Territorio. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt)

desde 2015 y profesor del Programa para el Desarrollo Profesional Docente de la Secretaría de Educación Pública (Prodep-SEP).

Belkis Coromoto Sulbarán Rangel

Profesora investigadora de la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá); pertenece al Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI) nivel candidato 2017-2019. Ingeniera Forestal de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela; magíster en Ciencias de Productos Forestales de la Universidad de Guadalajara, México; doctora en Ciencia de Materiales. Autora de artículos en revistas internacionales indexadas en el *Journal Citation Report* (JCR) y cuenta con diversas participaciones en congresos nacionales e internacionales de reconocido prestigio. Actualmente pertenece a la planta de profesores de la licenciatura en Ingeniería en Energía, Maestría en Ciencias en Ingeniería para el Agua y la Energía y el Doctorado en Agua y Energía del CUTonalá. Pertenecer al cuerpo académico en formación materiales avanzados y sus aplicaciones UGU-910.

Javier Abraham Hernández Díaz

Ingeniero Topógrafo de la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI); magíster en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía (2018) de la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá). Miembro fundador del Colegio de Ingenieros Topógrafos Geodestas del Estado de Jalisco (CITGEJ). Actualmente es investigador invitado en la Universidad de Auburn (Alabama, Estados Unidos), Forest Products Development Center, School of Forestry and Wildlife Sciences participando en investigaciones de aplicación para biomateriales con el grupo de Forest Products Development Center.

Hasbleidy Palacios Hinestroza

Estudiante del Doctorado en Agua y Energía, de la Universidad de Guadalajara en el Centro Universitario de Tonalá; magíster en Ciencia de Productos Forestales, de la Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Ingeniera Agroforestal de la Universidad Tecnológica del Chocó, Diego Luis Córdoba, Colombia, especialista Tecnológica en Innovación para el Aprovechamiento de la Biodiversidad Vegetal, del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) Chocó, Colombia. Cuenta con dos diplomados, uno en Gestión Regional de la Investigación y la Innovación en Ciencias y Tecnologías de la Universidad de Antioquia, Colombia, y otro en Pedagogía y Docencia Universitaria, de la Universidad Tecnológica del

Chocó, Colombia. Además, ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales en Colombia, Costa Rica, México y Estados Unidos. Desde 2011 es miembro activo en el Grupo de Investigación Valoración y Aprovechamiento de la Biodiversidad de la Universidad Tecnológica del Chocó y desde 2009 pertenece a la Asociación Nacional de Ingenieros Agroforestales. Actualmente, también es miembro de La Red Temática de Ingeniería de Superficies y Tribología, México.

Florentina Zurita Martínez

Maestra en Ingeniería (opción ambiental) en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y doctora en Ciencia y Tecnología en el área de Ingeniería Ambiental, en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Es evaluadora de proyectos nacionales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y árbitro de revistas internacionales como *Journal of Ecological Engineering*, *Science of the Total Environment*, *Water Research*, *Chemosphere*, *Water Science and Technology*, *Environmental Technology*, *Water of Journal and Health*, entre otras. Desde 2004 se ha enfocado en la investigación sobre humedales de tratamiento y fitorremediación para la remoción de contaminantes convencionales, metales pesados y emergentes de aguas y aguas residuales. Sobre esta línea de investigación ha dirigido numerosas tesis de licenciatura, maestría y doctorado, y ha generado alrededor de 30 publicaciones indexadas en el *Journal Citation Report* (JCR), además de una patente otorgada y otra en proceso. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I y cuenta con perfil Prodep.

Este libro se
terminó de imprimir
en noviembre de 2018
en la Editorial UD
Bogotá, Colombia