



MODELACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HIDROLÓGICOS Y DINÁMICAS DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MOCOA

Miguel Bedoya Paniagua¹, Elizabeth Riaño Umbarila²,
Mauro Reyes Bonilla³, Carlos Salazar Cardona⁴

RESUMEN

El presente artículo aborda una caracterización de las condiciones socioeconómicas del municipio de Mocoa, y un ejercicio de modelación de servicios ecosistémicos hidrológicos para la cuenca del río Mocoa.

En este sentido, se presenta una estimación de la oferta hídrica y la retención de sedimentos como servicios ecosistémicos priorizados para el ejercicio de modelación hidrológica, a partir de diferentes escenarios de variabilidad climática y cambio climático. Así mismo, se considera un análisis de los cambios en el control de la erosión en dos áreas de importancia estratégica para la provisión de agua del municipio de Mocoa, para lo cual se considera el impacto en el aumento de sedimentos en condiciones de pérdida de cobertura boscosa.

Con base en lo anterior, se establece un panorama de servicios ecosistémicos hidrológicos para el río Mocoa, como una forma de comprender la distribución de estos servicios y posibles tendencias que pueden afectar a los beneficiarios del recurso hídrico. Con este fin, se consideran, además, los diferentes intereses por el desarrollo de actividades extractivas en la cuenca, los cuales conllevarán cambios en

el uso del suelo, lo que se traduce en afectaciones al bienestar de la población y retos a futuro para garantizar la cantidad y calidad del recurso hídrico.

Palabras clave

Recurso hídrico, servicios ecosistémicos, usos del suelo, anillo de poblamiento, modelación.

ABSTRACT

This article deals with a characterization of the socioeconomic conditions of the municipality of Mocoa, and an exercise of modeling of hydrological ecosystem services for the Mocoa river basin.

In this sense, an estimate of water supply and sediment retention is presented as ecosystem services prioritized for the hydrological modeling exercise, based on diverse scenarios of climate variability and climate change. Also, an analysis of changes in erosion control in two areas of strategic importance for the provision of water in the municipality of Mocoa is considered, taking into account the impact on the increase of sediment in conditions of forest coverage loss.

¹ Investigador Programa de Dinámicas Socioambientales – Instituto Sinchi.

² Investigador Programa de Dinámicas Socioambientales – Instituto Sinchi.

³ Investigador Principal I – Instituto Sinchi.

⁴ Coordinador Programa de Dinámicas Socioambientales – Instituto Sinchi.

Based on the above, a panorama of hydrological ecosystem services is established for the Mocoa River in order to understand the distribution of these services, and the possible trends that can affect the beneficiaries of the water resource. For this purpose, the different interests for developing extractive activities in the basin are also considered which will lead to changes in land use, and result in impacts on the wellbeing of the population and future challenges to guarantee the quantity and quality of hydric resource.

Keywords

Hydric Resource, Ecosystem Services, Uses Of Soil, Population Ring, Modeling.

INTRODUCCIÓN

El mapeo de los servicios ecosistémicos es una herramienta que permite identificar áreas con un significativo potencial para la provisión de tales servicios. Este tipo de ejercicios adquieren gran importancia en lugares en donde es necesario conocer con mayor profundidad los beneficios que se obtienen de los ecosistemas, a fin de fortalecer argumentos y posibles estrategias para un desarrollo mejor planificado. En este sentido y con el ánimo de reconocer la distribución de servicios ecosistémicos hidrológicos, específicamente la oferta hídrica y la retención de sedimentos, se usaron los modelos de InVEST – (Valoración Integrada de Servicios Ecosistémicos y Costos de Oportunidad), los cuales fueron desarrollados por el proyecto de Capital Natural (Universidad de Stanford, Universidad de Minnesota, The Nature Conservancy y WWF) y están diseñados para fortalecer y apoyar la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales. (Sharp, y otros, 2015). Este análisis permitió *mapear* (realizar el mapeo) y reconocer tendencias de cambio espacial en la distribución de estos servicios en la cuenca del río Mocoa.

Como parte del ejercicio se realizó un análisis de las dinámicas espaciales y temporales resultantes del proceso de ocupación y poblamiento del municipio de Mocoa. Este estudio señala en cifras el avance del anillo de poblamiento sobre un territorio de gran potencial hídrico, en el que confluyen intereses económicos por la extracción de minerales (cobre, oro, molibdeno),

materiales de construcción e hidrocarburos. Esto permite evidenciar el conflicto ambiental que se vislumbra frente a los títulos y solicitudes mineras, así como los bloques petroleros que se traslapan con áreas protegidas a nivel local y resguardos indígenas.

La modelación se desarrolla con el propósito de contar con información zonificada que relacione aquellos lugares con potencial para la prestación de servicios ecosistémicos, que benefician a las comunidades, para, de esta manera, generar información que permita planificar de una forma racional el desarrollo de los municipios relacionados con la cuenca. Esto, claro está, se realiza bajo conocimiento de que, actualmente, en diversas zonas del área de estudio hay títulos mineros y solicitudes de titulación minera; actividades que de llevarse a cabo pueden afectar la calidad ambiental y la provisión de los servicios ecosistémicos.

El presente trabajo describe el ejercicio realizado con el fin de evaluar los servicios ecosistémicos en mención, basados en las condiciones características de escenarios de variabilidad climática como la sequía, condiciones de invierno y el cambio climático; a partir del desarrollo de una línea base en la cuenca que permitiera entender los diferentes cambios y tendencias de estos servicios con relación a dichos escenarios. Así mismo, se realizaron ejercicios focalizados en áreas de importancia estratégica como son las microcuencas de la quebrada Almorzadero y el río Mulato, donde confluyen diferentes intereses económicos basados en el desarrollo minero.

Finalmente, es necesario precisar que el alcance de las simulaciones abordadas en áreas de importancia estratégica corresponde a fines comparativos, dadas las limitaciones de información sobre mediciones de sedimentos, lo cual requiere que se incremente el número de estaciones y mediciones históricas de este tipo de variables.

ÁREA DE ESTUDIO Y PRESIONES SOCIOAMBIENTALES

Para realizar la modelación de los *Servicios Ecosistémicos* (SE) hidrológicos que prestan las fuentes hídricas, el desarrollo de este trabajo se focalizó en el municipio de Mocoa y, en particular, en la cuenca



del mismo nombre, dada su importancia estratégica en el suministro de agua potable para la población tanto del área rural como del área urbana. Previa consideración de que las microcuencas de los ríos Almorzadero y Mulato han sido priorizadas por Corpoamazonia según los lineamientos del Decreto 953/2013, se modeló el aumento de la exportación de sedimentos bajo una pérdida de cobertura boscosa, con el fin de evidenciar la magnitud del SE que prestan las coberturas naturales actuales.

En primer lugar, se describe la dinámica poblacional y las actividades económicas que se desarrollan en el municipio. Luego, se expone la utilidad e importancia de la modelación de los SE y, posteriormente, se desarrolla el ejercicio de modelación a nivel de cuenca y microcuenca empleando la metodología propuesta en la plataforma InVEST.

Municipio de Mocoa

El municipio de Mocoa, capital del departamento de Putumayo, se localiza en el extremo Noroccidental

de este departamento. El Municipio fue creado mediante Decreto 132 de 13/02/1958. Posee una extensión de 123,300 hectáreas; cuenta con 53 veredas y cinco (5) Inspecciones de Policía -Mocoa, El Pepino, Yunguillo, Condagua y Puerto Limón- (Alcaldía de Mocoa, 2012). La zona urbana está compuesta por 64 barrios legalmente constituidos y más de 15 que no se encuentran legalizados. El municipio limita al sur con los municipios de Villagarzón y Puerto Caicedo, al oriente con el municipio de Puerto Guzmán y el departamento del Cauca, al norte con el departamento del Cauca y al occidente con el municipio de San Francisco.

La dinámica poblacional en el municipio de Mocoa se ha caracterizado por una creciente urbanización, generada por los flujos de población desplazada que ha encontrado en los centros urbanos de la región, y de Mocoa en particular, una manera de resguardar su vida. Las estadísticas de DANE prevén que para 2020 casi el 85% de la población estará localizada en el casco urbano del municipio mientras que la zona rural solo alcanzará el 15%. Véase la tabla 1.

TABLA 1. POBLACIÓN EN EL MUNICIPIO DE MOCOA 1985-2020.

AÑO	URBANA	PORCENTAJE (%)	RESTO	PORCENTAJE (%)	TOTAL
1985	10,597.00	26.05%	30,075.00	73.95%	40,672.00
1990	13,754.00	30.28%	31,674.00	69.72%	45,428.00
1993	15,847.00	60.00%	10,565.00	40.00%	26,412.00
2000	21,405.00	66.19%	10,932.00	33.81%	32,337.00
2005	25,751.00	72.02%	10,004.00	27.98%	35,755.00
2015	34,111.00	81.07%	7,963.00	18.93%	42,074.00
2020	39,284.00	84.27%	7,332.00	15.73%	46,616.00

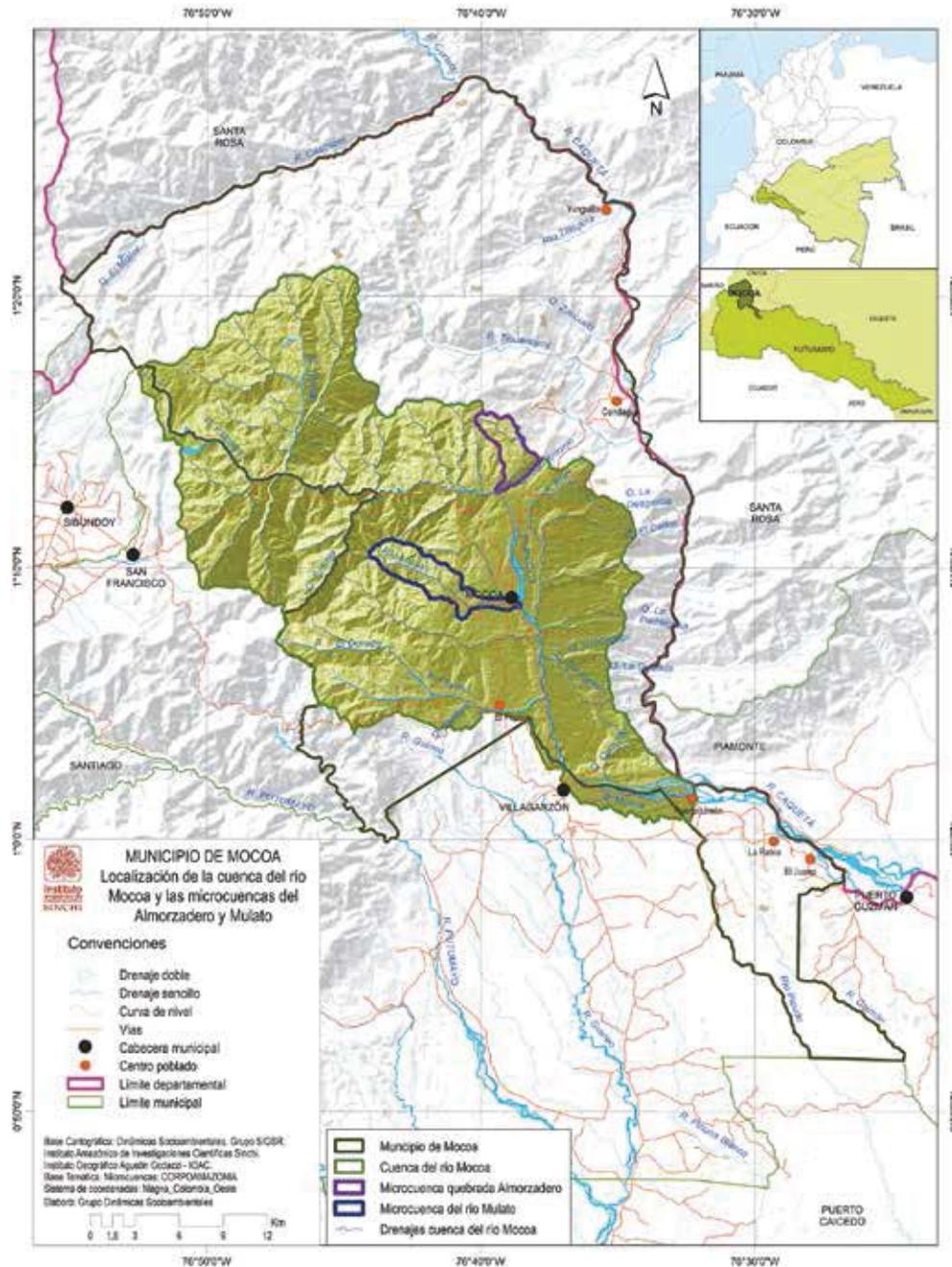
Fuente: DANE, 2011. Estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005-2020 total nacional por área a junio 30 de cada año.

Cuenca del río mocoa

La cuenca del río Mocoa, con una extensión aproximada de 67,530.00 Hectáreas, se localiza en una parte del extremo Noroccidental del departamento de Putumayo y forma parte de los municipios de Mocoa, San Francisco y Villagarzón. Cerca de su

desembocadura limita con el municipio de Piamonte, Cauca, como se muestra en el mapa 1.

Como parte del análisis, se presenta a continuación una caracterización de las condiciones socioeconómicas y las principales presiones socioambientales del área de estudio.



MAPA 1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Condiciones socioeconómicas

Para entender el crecimiento poblacional de Mocoa, se usó el indicador denominado porcentaje de cambio de la población⁵, entendido como el promedio anual de variación en el número de habitantes de un territorio entre dos instantes de tiempo (Instituto Sinchi, 2007). Dicho porcentaje de cambio se calculó para el municipio de Mocoa, el departamento de Putumayo, la región Amazónica y la Nación, discriminado por clase (cabecera, resto y total). En las entidades territoriales analizadas se pudo observar que entre 1985 y 2015 la tendencia fue la reducción del crecimiento. Los valores del indicador para Mocoa se destacan por ser altos con relación al país, la región y el departamento, especialmente en el área urbana, explicados por el rol como receptor de población desplazada que ha cumplido este centro urbano.

El decrecimiento presentado en el área rural del municipio en el periodo 1985-1993 fue el más alto de los periodos analizados, manteniéndose la tendencia entre 1985 y 2015. Lo que llama la atención acerca de las condiciones y oportunidades que el sector rural está brindando a las comunidades pues no les permite mantenerse allí y los obliga a buscar formas de vida en el área urbana. Véase la tabla 2.

En cuanto a la densidad poblacional, en 1993 el perímetro censal del municipio de Mocoa se calculó en 189.4 hectáreas que alojaban 14,165.00 habitantes,

⁵ Para ver los detalles del cálculo de este indicador consulte su hoja metodológica en: <http://www.sinchi.org.co/index.php/indicad>

lo cual da como indicador de densidad urbana 74.79 hab/ha. En 2005 este valor fue 135.96 hab/ha, cercana al doble del censo anterior pues el perímetro censal no cambió pero la población localizada en el área urbana se incrementó, llegando a los 25.751 habitantes.

Con excepción de Puerto Asís, para el cual se obtuvo como resultado una reducción en su densidad urbana, debido a que su perímetro urbano creció de forma importante, a diferencia de su población. Todos los centros urbanos del departamento de Putumayo incrementaron este indicador, siendo Valle del Guamuez, Villagarzón, Mocoa, Puerto Guzmán, Puerto Caicedo y Orito, los de mayor crecimiento. Por su parte, en 2005 Mocoa contaba con una población rural de 10,004.00 habitantes y una superficie de 133,000.00 hectáreas, También se estimó la población indígena del municipio de Mocoa en 4,922.00 habitantes equivalente al 11.70% de sus 42,074.00 pobladores, para el año 2015. Esta población indígena hace parte de diez resguardos.

La densidad de viviendas en un área está relacionada con el modelo de ocupación territorial y las tipologías de construcción, ya sean de concentración o dispersión. La densidad por sí misma no es un factor determinante de ello, tan solo da cuenta del hecho, pues entra en juego la forma del propio tejido urbano. Para el caso de Mocoa y demás municipios de Putumayo se realizó el cálculo de la densidad habitacional a partir de los datos censales de 1993 y 2005, el perímetro urbano y el número de viviendas reportado por los mismos.

TABLA 2. PORCENTAJE DE CAMBIO DE LA POBLACIÓN POR CLASE, 1985-2015

CONTEXTO	CLASE	1985-1993	1993-2005	2005-2015	1985-2015
NACIÓN	Cabecera	3.20	3.16	2.14	2.83
	Resto	2.26	0.91	0.59	1.16
	Total	2.59	1.79	1.27	1.83
REGIÓN	Cabecera	2.53	2.00	1.45	1.95
	Resto	0.95	-0.09	0.32	0.32
	Total	2.02	1.41	1.17	1.49
PUTUMAYO	Cabecera	3.88	3.47	2.17	3.15
	Resto	1.81	0.37	0.12	0.67
	Total	2.50	1.58	1.07	1.66
MOCOYA	Cabecera	5.03	4.05	2.81	3.90
	Resto	-13.08	-0.45	-2.28	-4.43
	Total	-5.40	2.52	1.63	0.11

Fuente: Grupo Dinámicas Socioambientales. Instituto Sinchi. Cálculos para la región Amazónica y Colombia a partir de DANE, 2011. Estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005-2020 total nacional por área a junio 30 de cada año.

En 1993 el número de viviendas por hectárea más alto se registró en Puerto Guzmán y en 2005 en La Hormiga, Valle del Guamuez. Se observó un fuerte crecimiento del indicador entre los dos momentos de análisis en el caso de este último y de Mocoa, fenómeno que podría explicarse por causa de las captaciones ilegales que funcionaron durante aquellos años y por la fuerte demanda generada por efecto del desplazamiento.

Con respecto a la prestación de los servicios públicos, se encontró que los indicadores en términos generales son altos para el municipio de Mocoa si se comparan con el total departamental y regional, aclarando que no se considera la calidad del servicio. No obstante, los indicadores más altos por disponibilidad de servicios públicos en área rural y urbana los presentan los municipios del Alto Putumayo. Si bien los valores de Mocoa son relativamente altos en el área urbana, aún presenta déficit en el área rural en los cuatro servicios analizados (acueducto, alcantarillado, energía eléctrica y telefonía).

El casco urbano de Mocoa posee cuatro fuentes abastecedoras de acueductos, dos en el río Mulato que abastecen el Centro y la zona Sur del municipio; La zona de Barrios Unidos es alimentada por las fuentes provenientes de las quebradas Taruquita y Conejo; la zona Norte es alimentada por el acueducto del Alto Afán, proveniente de la quebrada El Almorzadero. En el Plan Básico de Ordenamiento Territorial se indica que el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado busca construir un solo acueducto, subiendo la Bocatoma a unos seis kilómetros de la ciudad, aprovechando una cota superior a los 800 m.s.n.m. evitando la atomización de acueductos y construyendo una sola planta de tratamiento.

Con respecto a la tenencia y uso de la tierra en el municipio de Mocoa se realizó un análisis de la distribución de la propiedad rural a partir de la información predial por rangos de tamaño generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, considerando la clasificación propuesta por esta entidad (IGAC, 2012) en función de la superficie, así:

GRANDE: predios con una extensión mayor a 200 hectáreas.

MEDIANA: predios entre 20 y 200 hectáreas.

PEQUEÑA: predios entre 10 y 20 hectáreas.

MINIFUNDIO: predios entre 3 y 10 hectáreas.

MICROFUNDIO: predios menores de 3 hectáreas.

IGAC (2012).

De esta manera, se encontró que en el municipio de Mocoa, sumada la pequeña propiedad, el minifundio y el microfundio no alcanzan el 8% de la superficie municipal registrada en catastro. La mediana propiedad equivale al 20% y el 73% de la tierra municipal que corresponde a la gran propiedad. Así mismo, al observar el número de propietarios, se encontró que la gran propiedad estaba en manos de 9 titulares en 2005 y 18 en 2014, equivalentes al 0.20% del territorio catastrado, mientras que la pequeña, propiedad, el minifundio y el microfundio representan cerca del 80% de los titulares, siendo las propiedades de menos de 3 hectáreas las que tienen el mayor número de propietarios. Por su parte, el número de predios rurales está en estrecha relación con el número de propietarios; así, los de mayor tamaño son menos y los pequeños son los más fragmentados, es decir más numerosos.

Desde el punto de vista económico, se revisaron los usos del suelo. En los usos del suelo rural se encontraron dos marcadas líneas: la agropecuaria y el turismo. En la primera, las actividades económicas del área rural de Mocoa se centran en los sectores pecuario y agrícola. El sector agrícola está condicionado por las características de los suelos, reduciéndose en su mayoría a actividades de subsistencia con pocos excedentes, exceptuando el plátano. Estos productos son en su mayoría mercadeados a nivel local.

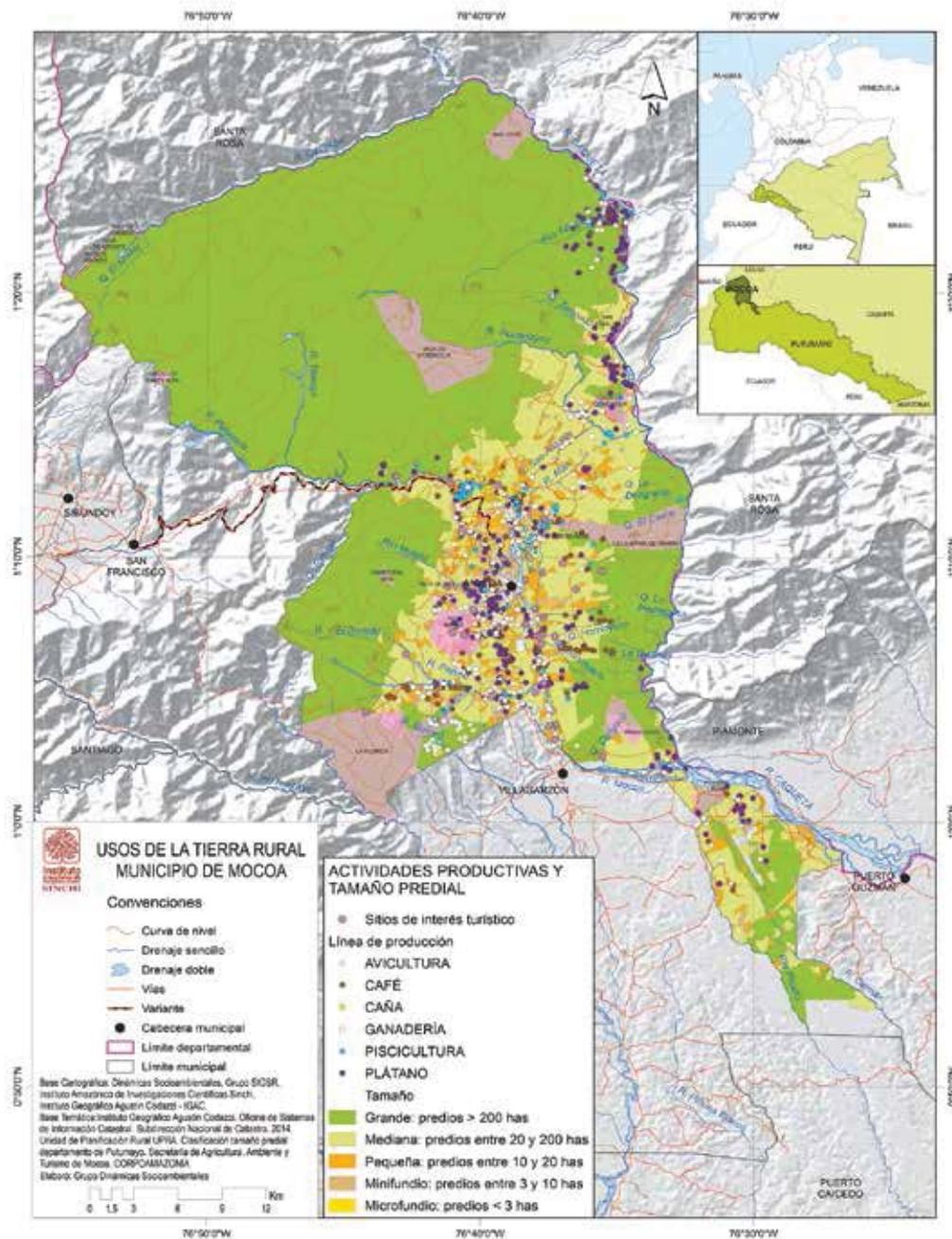
El municipio tiene estrecha relación comercial para productos del sector primario con Pasto-Nariño y Pitalito-Huila, de donde proviene más del 90% del volumen mercadeado, según señala el POT (2006). La venta de productos locales se reduce a cárnicos (vacuno y porcino), pescados (cachama y tilapia), aves, yuca, plátano y frutales en cosecha. Algunos cultivadores incursionan en la producción de café.

En el sector rural, varias industrias han probado su funcionamiento (panelera, lácteos, harina de plátano, café y licores) así como microindustrias de néctares, dulces, y jaleas, sin mayor impacto en el territorio.

De acuerdo con los datos de la Secretaría de Agricultura Municipal, en las 56 veredas que conforman el área rural de Mocoa las actividades productivas se desarrollan en 34,033.00 hectáreas, distribuidas en ganadería (10,872.00 hectáreas equivalentes al 31.9%), avicultura (6,464.00 hectáreas equivalentes al 19%), piscicultura (2,663.00 hectáreas equivalente al 7.8%), cultivos de plátano (9,625.00 hectáreas

equivalente al 28.3%), café (2,645 hectáreas equivalente al 7.8%) y caña (1,764.00 hectáreas equivalente al 5.2%).

Al cruzar la localización de los productores con el tipo de propiedad, se pudo observar que las actividades agrícola, piscícola y avícola se desarrollan en la pequeña propiedad, el minifundio y el microfundio,



MAPA 2. USOS DE LA TIERRA RURAL EN MOCOCA.

mientras que en la mediana y grande se establece la ganadería. De los 2200 productores censados, se tiene que 1115 se dedican a actividades agrícolas; la avicultura y la piscicultura la desarrollan 802 y la actividad ganadera la desarrollan en 283. Ver mapa 2.

En cuanto al turismo, de acuerdo con información georeferenciada tomada de Corpoamazonia (2015) en un inventario aún incompleto, se identifican al menos 38 sitios que ofrecen atractivos turísticos de significativo valor ecológico, ambiental, paisajístico y recreativo, en el municipio de Mocoa. Esta oferta constituye un potencial de ingreso para los pobladores, pero requiere manejo adecuado, con criterios de conservación y una fuerte pedagogía de protección ambiental.

Ahora, en relación al suelo urbano, este se encuentra ocupado en su mayor parte por edificaciones y está dotado de las infraestructuras básicas que permiten su urbanización (acceso vial, electricidad, abastecimiento de agua potable y alcantarillado). La manufactura local está representada por los renglones de las panaderías, aserrios y similares, plásticos, joyerías, tapicerías, publicidad, y metalmecánica (talleres de ornamentación) sin trascender el ámbito municipal. El sector terciario se fundamenta en las relaciones comerciales con Bogotá, Pasto, Cali, Medellín y Neiva, con productos como ropa, calzado, restaurantes, comidas rápidas, cacharrería y variedades, abarrotos y tiendas, servicios técnicos, panaderías, ferreterías, droguerías, plásticos, almacenes agropecuarios, electrodomésticos y otros como el petróleo.

El Censo DANE 2005, identificó en el centro urbano de Mocoa 4 ramas de actividad (I, J, K, O) que se clasifican en Transporte (I), almacenamiento y comunicaciones (J); Intermediación financiera; Actividades inmobiliarias (K) y Otras actividades (O) que son las proveedoras del empleo local.

PRINCIPALES PRESIONES SOCIOAMBIENTALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

A partir del mapa de coberturas, se pudo observar que el municipio de Mocoa en el año 2002 presentaba un 66.21% de su territorio en cobertura de

bosques, valor muy inferior al total regional que para aquella fecha era del 85.8%. Las áreas transformadas equivalían al 22.61%, valor superior al 7.4% del total presentado por la región. En el año 2007 Mocoa tuvo un ligero incremento en el número de hectáreas de bosques 67.9%, pero crecieron también las áreas transformadas (25.06%). En 2012 el bosque se redujo levemente así como las áreas transformadas. Sin embargo, al comparar estas cifras con el nivel regional, donde se mantuvo la reducción del número de hectáreas de bosque (83.6%), la existencia de esta cobertura en Mocoa sigue siendo proporcionalmente inferior comparada con el valor regional de 67.86% y un 24.5% de hectáreas transformadas superior al 9.6% de la región.

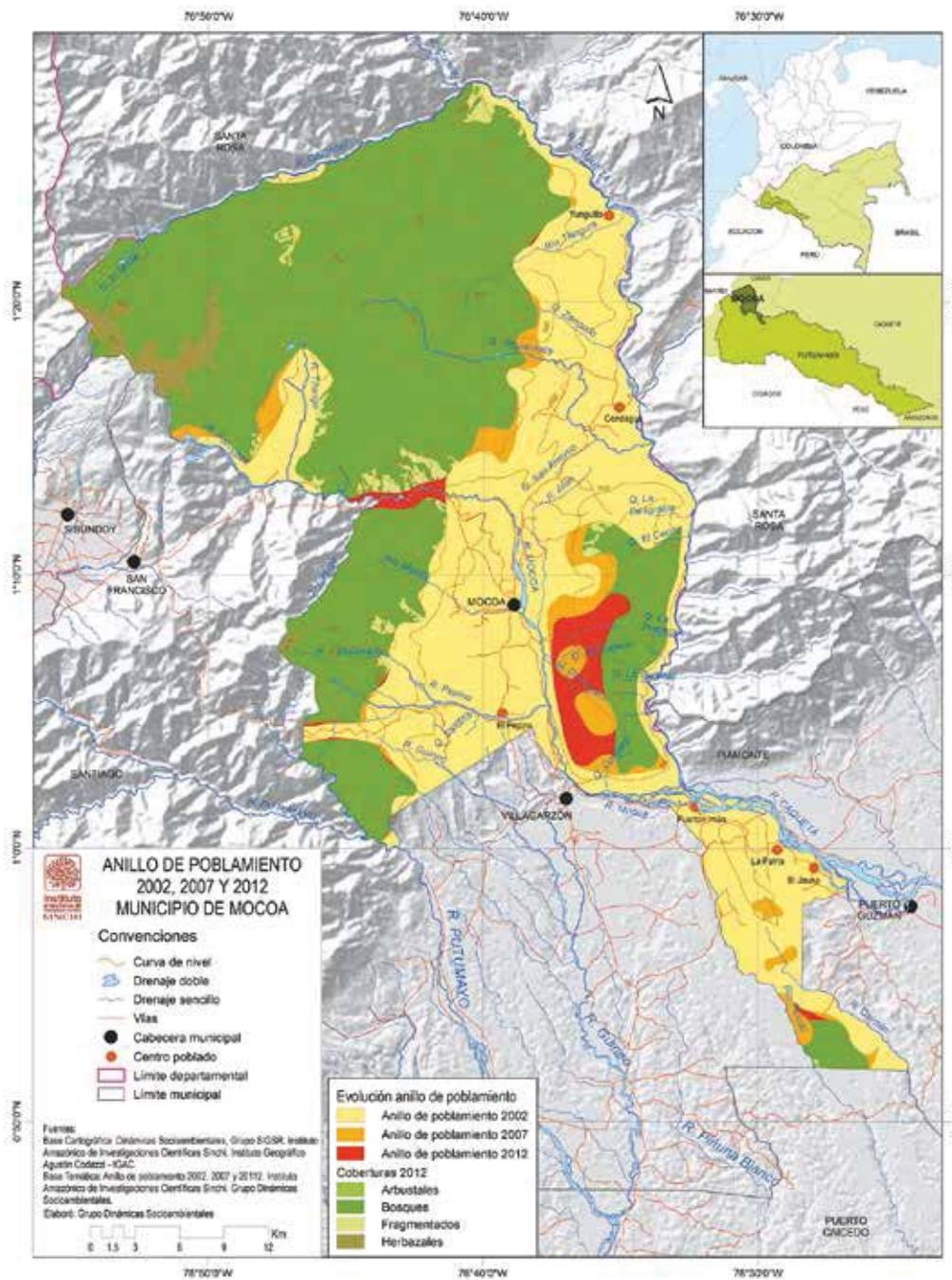
El anillo de poblamiento de la Amazonia colombiana es la continuación del sistema urbano periférico nacional en el sur del país, fenómeno que se explica por la construcción social del territorio y que significa la consolidación de lo urbano-rural a través de la red de centros poblados y ejes viales, las coberturas antrópicas (pastos y cultivos), las áreas intervenidas -áreas transformadas- y la concentración de población en áreas urbanas. Se fundamenta en una construcción continua para la producción y circulación de mercancías. El anillo de poblamiento es un escenario común tanto para la Amazonia colombiana como para el resto de los países amazónicos. El cálculo de la configuración del anillo de poblamiento en los años 2002, 2007 y 2012 da cuenta del avance de este proceso de ocupación de la región y en el municipio de Mocoa. Ver mapa 3.

La extensión del anillo para el año 2002 se calculó en 9'260,819.00 hectáreas, para 2007 su superficie sumaba 9'485,681.00 has con crecimiento del 2% con relación al primer año de referencia y en 2012 alcanzó los 10'555,739 registrando un crecimiento del 10% con respecto a 2007. La extensión del anillo en 2002 correspondía al 19.17% del territorio amazónico colombiano, en 2007 al 19.63% y en 2012 al 21.85% de la región.

El departamento de Putumayo presentaba en 2012 el 53.3% de su territorio involucrado en el anillo de poblamiento. Los municipios de Valle del Guamuez, San Miguel y Puerto Caicedo, tenían más del 90%. Colón, Sibundoy, Puerto Guzmán, Puerto Asís, Orito y Villagarzón tenían más del 50%, mientras

que San Francisco, Mocoa, Santiago y Puerto Le-
guízamo tenían más del 30% de superficie munici-
pal dentro del anillo. Los 13 centros urbanos del
departamento de Putumayo se encuentran dentro
del anillo de poblamiento amazónico.

Al observar los datos de porcentaje de superficie
dentro del anillo de poblamiento amazónico, el cual
es un indicador que representa la proporción de la
superficie de un determinado municipio o corregi-
miento departamental, -que se encuentra dentro del
área de poblamiento continuo y jerarquizado-, con



MAPA 3. ANILLO DE POBLAMIENTO 2002, 2007 Y 2012 EN EL MUNICIPIO DE MOCOCA.

respecto a la superficie total del anillo en un momento de tiempo determinado, se encontró que dicha área en Mocoa equivalía al 0.58% del total regional en 2002, al 0.60% en 2007 y al 0.57% en 2012.

En el municipio de Mocoa, el anillo de poblamiento marca una tendencia creciente. Así, en 2002, el 40.36% de su territorio se localizaba dentro del anillo de poblamiento, en 2007 aumentó a 42.89% y en 2012 marcó un 45.21%, evidenciando la tendencia de expansión del anillo.

Con respecto a la situación de oferta y demanda hídrica, el municipio de Mocoa no presenta problemas de escasez hídrica, toda vez que la situación general del departamento se encuentra dentro de la categoría más baja “Muy Bajo” en su relación de oferta y demanda hídrica respresentada por el Índice de Uso de Agua (IDEAM, 2015). Esta situación también se presenta en las principales subcuencas del municipio, como se ha documentado para su principales cuencas de abastecimiento. En efecto, la cobertura de

acueducto alcanza el 82.5% de la población. El suministro de agua se hace a través de la Administración Municipal, de la Empresa de Acueducto Barrios Unidos de Mocoa y de la Junta Administradora de Acueducto y Alcantarillado de Mocoa, las cuales cuentan con concesiones de 11, 40 y 116 l/s de las quebradas Almorzadero y Taruquita y de río Mulato respectivamente, pertenecientes a la cuenca del río Mocoa.

En una revisión de las concesiones de uso de agua, se encontró que en la actualidad se concesionan 20.3 millones de metros cúbicos lo cual corresponde al 0.6% del total de la demanda hídrica nacional. La demanda hídrica de Mocoa se encuentra de manera principal, explicada en un 51% por el sector acuícola y 47% por el sector doméstico (Figura 1). Con respecto a la composición de la demanda hídrica doméstica, para el 2014 existían un total de 6.577 suscriptores donde la mayoría se concentraba en el primer estrato con el 74.7%; el pago de las facturas promedio va desde los \$8,286.00 a los \$3,815.00 (Tabla 3).

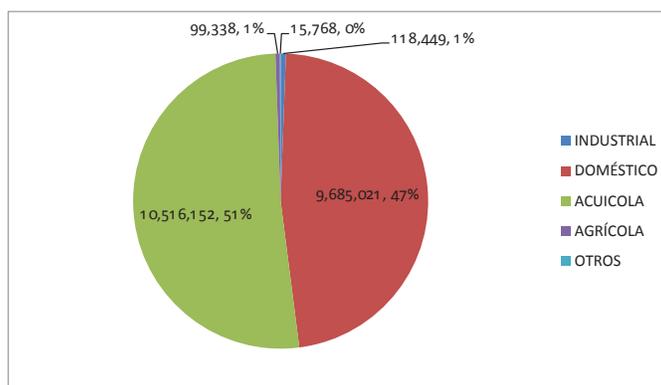


FIGURA 1. COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA SECTORIAL.

Fuente: Concesiones de agua – Corpoamazonia.

TABLA 3. COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA DOMÉSTICA EN MOCOA.

ESTRATO	Suscriptores	%	Factura Promedio (\$)
Estrato 1	4914	74.7	8,286.00
Estrato 2	1223	18.6	12,637.00
Estrato 3	435	6.6	18.055.00
Estrato 4	0	0.0	0.00
Estrato 5	5	0.1	34,815.00
Estrato 6	0	0.0	0.00
TOTAL	6577	100	

Fuente Superintendencia de Servicios (2014).

En este contexto de crecimiento poblacional, usos predominantes de los suelos para pastos y ganadería, predominio de la gran propiedad, y un proceso de urbanización activo en el municipio de Mocoa, se presenta a continuación el ejercicio de modelación de servicios ecosistémicos hidrológicos en la cuenca del río Mocoa. Esto se hace como una forma de cuantificar tales servicios y sus tenencias ante diferentes escenarios de variabilidad climática y cambios de cobertura de los suelos. Entendiendo la estrecha relación entre la calidad y cantidad de estos servicios con el bienestar de la población, no solo del municipio de Mocoa, sino también de todos los sectores beneficiarios del recurso hídrico en la cuenca, es importante reconocer la distribución y oferta de servicios ecosistémicos hidrológicos bajo condiciones medias y en escenarios de clima cambiante. En este contexto se considera entonces una caracterización de dichos servicios a partir de una valoración ecológica abordada para la cuenca del río Mocoa, como insumo fundamental para ejercicios de valoración económica.

ENFOQUE METODOLÓGICO

El enfoque escalonado propuesto por el informe de “La economía de los ecosistemas y la diversidad” (TEEB, por sus siglas en inglés), sugerido por la

Política Nacional Para la Gestión de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE) es el principal marco metodológico de esta propuesta (IAVH, 2012), la cual parte de una modelación de servicios ecosistémicos como un elemento de valoración biofísica que permite reconocer la capacidad de la cuenca para brindar estos servicios y así mismo servir como insumo para ejercicios de valoración monetaria.

Esta metodología se resume en 4 pasos orientadores, que no reducen el valor del área a indicadores monetarios sino que está orientada a la obtención de un conjunto de indicadores cualitativos y cuantitativos encaminados hacia una valoración integral de los SE. (Figura 2).

El informe TEEB también sugiere, dentro de la síntesis del enfoque, que la valoración de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos puede llevarse a cabo con algún grado de especificidad según cada situación concreta (Brondízio & May, 2010). Los pasos descritos arriba también se han resumido del siguiente modo: i) reconocer el valor: en un ejercicio cualitativo que implica el conocimiento de naturaleza intrínseca del lugar. En diversos casos, dicho reconocimiento ha llevado a la declaración de un área protegida o un acuerdo voluntario por ejemplo, donde la monetización de los atributos incluso



FIGURA 2. ESQUEMA DE VALORACIÓN INTEGRAL (ECONÓMICA Y NO ECONÓMICA) DE LA BIODIVERSIDAD Y SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.

Fuente: IAVH (2012).

puede ser contraproducente si se considera que contradice las normas culturales o no consigue reflejar una pluralidad de valores; ii) demostrar el valor: en donde el uso de indicadores monetarios es útil para efectos de legislación, empresas y gobiernos a la hora de tomar decisiones y en general la consideración de los costos y beneficios de conservar (o la ausencia) de los servicios ecosistémicos; iii) captar valor: el cuál consiste en la introducción de mecanismos que incorporen valores de los ecosistemas en la toma de decisiones mediante instrumentos económicos y financieros tales como los esquemas de Pagos por Servicios Ambientales, el cobro de entradas a un área protegida, la reducción de cargas fiscales y la creación de nuevos mercados.

Como un ejercicio piloto, esta modelación hecha en InVEST versión 3.2.0, se orientó hacia la afectación de los servicios hidrológicos de rendimiento hídrico, regulación hídrica y retención de sedimentos ante condiciones cambiantes del clima y usos del suelo con afectación potencial a los mismos. Estos resultados podrían contribuir a la implementación de técnicas tanto de valoración económica como de valoración contingente, la cual busca evidenciar la pérdida de bienestar en la población local por las presiones socioambientales identificadas con énfasis en el desarrollo minero.

Información utilizada modelo de rendimiento hídrico

Para el cálculo de la oferta hídrica se usó información climática anual en el periodo comprendido entre 1984 a 2012 para 19 estaciones con mediciones de precipitación y 13 estaciones con mediciones de temperatura máxima, media y mínima para el periodo de 1990 a 2010. La información de las series de precipitación fue evaluada a partir de un análisis de homogeneidad usando las pruebas de test MWW, test-L, test-T; las cuales de acuerdo con Sánchez Rodríguez & Corredor Llano (2013), son utilizadas con frecuencia para verificar la homogeneidad de mediana, varianza y media; este ejercicio fue desarrollado en el programa Jaziku, de inferencia estadística para el análisis de teleconexiones.

A partir de este ejercicio se trabajó con las estaciones de precipitación homogéneas, lo cual permitió

zonificar la precipitación usando el método del Inverso de la Distancia (IDW). Entre tanto, para el cálculo de la evapotranspiración potencial se usó el método de Thornthwaite con base en la información sobre temperatura de la red de estaciones meteorológicas de referencia al interior y cercanas al área e estudio. Así mismo, para para obtener el raster de profundidad efectiva del suelo, se analizaron las unidades de suelo, con sus respectivos perfiles y horizontes, encontrados en el anexo de perfiles del Estudio departamental de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, así mismo se usaron las coberturas del año 2014 obtenidas del Sistema de Información Ambiental Colombiano (SIAC), teniendo en cuenta estas coberturas se usó el coeficiente del cultivo (K_c) se presente en las guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (FAO, 2006).

Con relación a la fracción de agua disponible para las plantas (PAWC), por sus siglas en inglés, se usó el programa SPAW, en el cual entra como insumo, la información sobre la clase textural del suelo obtenida a partir del estudio de suelos y su codificación. Al contar con estos valores, se zonifican en la cuenca para ingresar al modelo. Finalmente se usó el shape de cuencas y Subcuencas delimitadas por Corpoamazonia.

Información utilizada modelo de retención de sedimentos

Con el fin de ejecutar este modelo se usó la información climática sobre precipitación anteriormente descrita como insumo para estimar el factor de erosividad de la lluvia, en el cual se consideró el índice Modificado de Fournier presentado por Arnoldus (1997); este índice es considerado como un buen estimador de la erosividad de las lluvias para el modelamiento de los procesos erosivos en zonas tropicales (Hoyos, Waylen, & Jaramillo, 2005). De igual forma, se obtuvo el factor de erodabilidad del suelo, a partir de la clase textural que se obtuvo del estudio de suelos para el departamento de Putumayo.

Entre tanto, se usó un modelo de elevación digital con una resolución de 30 metros, el cual fue obtenido a partir de la plataforma web de EarthExplorer,

en donde se encuentra información satelital de misiones realizadas por la NASA.

Finalmente, los parámetros C y P se obtuvieron a partir del estudio de Wischmeier & Smith (1978), en donde se consideran este tipo de parámetros de acuerdo con diferentes usos de la tierra.

Escenarios contemplados

Para la evaluación ecológica, se consideraron los escenarios abajo indicados según relevancia e información disponible. Obsérvese que estos obedecen a una condición natural (variabilidad climática) y a un potencial escenario en el caso de la explotación de los títulos mineros existentes.

- **Línea base:** comprende el análisis de los promedios multianuales de información climática (precipitación y temperaturas máximas, medias y mínimas) para las estaciones al interior y cercanas a la cuenca desde el periodo de 1984 a 2012.
- **Escenario de año medio-seco:** comprende el año con las más bajas precipitaciones registradas desde el periodo de 1990 hasta el 2012. El año seleccionado corresponde a 1995, el cual de acuerdo con el consenso para clasificación de diferentes fases del ENSO corresponde con un año con afectaciones por el fenómeno del niño (IDEAM, 2010).

- **Escenario de cambio climático:** este escenario se estructura con base en la información de la tercera comunicación de Cambio Climático del IDEAM, en donde se desarrolla un escenario de ensamble multimodelo con referencia a las vías de concentración representativa RCP. Este escenario establece que para el departamento del Putumayo hacia la normal climatológica de 2041-2070 se tendrán aumentos de temperatura en 1.5°C, y aumentos de precipitación del 6.73%.
- **Escenario minero:** Para un análisis de los efectos que se podrían tener por la intervención minera, con relación al servicio ecosistémico de control de la erosión, se consideró una degradación de la cobertura boscosa con la inserción de tierras desnudas y degradadas. El ejercicio se focalizó en las áreas de importancia estratégica de la Quebrada Almorzadero, la cual se encuentra al interior de los títulos mineros señalados en la tabla 3 y la Subcuenca del río Mulato, la cual presenta intereses mineros por las solicitudes presentadas en la tabla 4.

En ese sentido se calcularon los sedimentos exportados hacia las fuentes hídricas en un escenario en el cual no existiera cobertura boscosa y se comparó con la cantidad de sedimentos exportados de acuerdo con las coberturas actuales en dichas fuentes hídricas.

TABLA 4. TÍTULOS MINEROS EN LA QUEBRADA EL ALMORZADERO

No.	Minerales	Titular	Fecha de terminación	Área dentro de la microcuenca Almorzadero (Has)
FJT-132	Mineral de cobre, plata zinc, y asociados, oro, platino, molibdeno	Sociedad Mocoa Ventures LTDA.	21/06/2037	119.39
FJT-142	Minerales de cobre, plata, zinc, y asociados, oro platino, molibdeno.	Sociedad Mocoa Ventures LTDA.	20/06/2037	863.77
FJT-131	Minerales de plata, zinc y asociados, oro, platino y molibdeno.	Sociedad Mocoa Ventures LTDA.	23/05/2037	28.72
FJT-141	Minerales de cobre, plata, zinc, oro, platino, molibdeno.	Sociedad Mocoa Ventures LTDA.	17/12/2036	3.27
JAP-16141	Minerales de cobre y sus concentrados, de plata y sus concentrados, oro y platino y sus concentrados, plomo, zinc y molibdeno.	Sociedad Mocoa Ventures LTDA.	10/10/2040	14.80

Fuente: Agencia Nacional de Minería. Títulos mineros 2015. Cálculos grupo Dinámicas Socioambientales.

TABLA 5. SOLICITUDES MINERAS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MULATO.

Código	Fecha Rad.	Estado	Minerales	Titulares	Municipios	Área (Has)	Área dentro en Subcuenca (Has)
JAP-16181	25/01/2008	Solicitud vigente-en curso	Minerales de cobre, plata, oro, platino, plomo, zinc y molibdeno	ANGLOGOLD ASHANTI COLOMBIA S.A.	MOCOA-PUTUMAYO	1644	15.63
LJR-11561	27/10/2010	Solicitud vigente-en curso	Materiales de construcción, minerales de cobre, plata y sus concentrados, oro, platino, y molibdeno	H MINES S.A.S	MOCOA-PUTUMAYO	5042	1276
QE7-08281	7/05/2015	Solicitud vigente-en curso	Materiales de construcción	GUILLERMO LE G U I Z A - MON VACA	MOCOA-PUTUMAYO	98.93	12.64

Fuente: Agencia Nacional de Minería. Solicitudes mineras 2015. Instituto Sinchi.

Como insumo básico para la modelación de servicios ecosistémicos hidrológicos, se solicitó información al IDEAM sobre series históricas mensuales de precipitación para 19 estaciones cercanas al área de estudio para el periodo de 1984 a 2012. (Tabla 6.)

TABLA 6. ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN CONTEMPLADAS EN EL ESTUDIO.

Código	Tipo	Nombre Estación	Corriente	Latitud	Longitud	Elevación	Departamento	Municipio
4401002	PM	Pepino El	Caquetá	1.07	-76.67	760	Putumayo	Mocoa
4401003	PG	Campucana	Caquetá	1.20	-76.67	1400	Putumayo	Mocoa
4401008	PM	Sta. Lucia	Caquetá	0.95	-76.43	500	Putumayo	Puerto Guzmán
4401009	PM	Condagua	Caquetá	1.27	-76.58	500	Putumayo	Mocoa
4401501	AM	Villagarzon	Mocoa	1.03	-76.62	440	Putumayo	Villagarzon
4401504	CO	Mocoa Acueducto	Caquetá	1.15	-76.65	650	Putumayo	Mocoa
4701003	PM	Pto Asís	Putumayo	0.47	-76.47	260	Putumayo	Puerto Asís
4701015	PM	Carrizal	Putumayo	1.13	-77.03	2300	Putumayo	Santiago
4401004	PG	Mínchoy	Putumayo	1.20	-76.82	2300	Putumayo	San Francisco
4701005	PM	Chungacaspi	Putumayo	1.13	-76.92	2100	Putumayo	San Francisco
4701018	PM	Torre Tv San Fco	Mocoa	1.13	-76.83	3000	Putumayo	San Francisco
4401011	PM	Pto Limón	Mocoa	1.02	-76.53	430	Putumayo	Mocoa
4701507	CO	Pto Umbria	Putumayo	0.83	-76.57	358	Putumayo	Villagarzon
4401710	LG	Angosturas	Caquetá	0.38	-76.35	325	Putumayo	Puerto Guzmán
4702001	PM	San Miguel	San Miguel	0.27	-76.92	406	Putumayo	San Miguel
4702002	PM	Churuyaco	Churuyaco	0.47	-77.08	500	Putumayo	Valle Del Guamez
4701508	CO	Monopamba	Sucio	0.80	-77.30	1776	Nariño	Puerres
2101021	PM	Montecristo	Guarapas	1.70	-76.18	1674	Huila	Pitalito
4401010	PG	Sta. Rosa	Caquetá	1.68	-76.57	1510	Cauca	Santa Rosa

La información obtenida corresponde a los valores promedio mensuales multianuales de precipitación para el periodo de 1984 a 2012, con esta serie consolidada de datos en 29 años consecutivos para dicha variable es posible acercarnos a la normal

climatológica, conocida como la línea base para el clima presente, la cual permite definir las condiciones climáticas de una zona en particular y realizar comparaciones (Ruiz Murcia, 2010).

Validación del modelo

Para la calibración de los resultados de la simulación de oferta hídrica, se consultó la disponibilidad de estaciones que contaran con información de caudales en el punto de cierre de la cuenca del río Mocoa. Para ello se revisó la base de datos de estaciones de caudales del IDEAM. Sin embargo, no fue posible encontrar una estación ubicada en este punto. No obstante, al consultar la disponibilidad de estaciones se encontró una estación con medición de caudales llamada Piedra Lisa II, la cual se ubica al centro de la cuenca. (Véase mapa 4). Esta estación cuenta con información de caudales medios mensuales en un rango de tiempo que va desde el año 1998 a 2010, con un porcentaje de datos faltantes del 20.7%; dada esta condición de la información observada, es importante precisar, que si bien los periodos de tiempo no son los mismos, -el rango de información de precipitación para el modelo corresponde a 1984-2012 (29 años), mientras que el rango de información para los cuales observados corresponde a 1998 a 2010 (13 años)-, la información sobre caudales medios permite tener una idea general para efectos comparativos sobre la oferta hídrica que arroja el modelo, con relación a datos observados los cuales aun cuando cuentan con limitaciones, pueden dar una guía general sobre la oferta hídrica en este punto de la cuenca.

De acuerdo con la ubicación de esta estación, se delimitó la cuenca, considerando como punto de cierre las coordenadas de la estación con medición de caudales (Piedra Lisa II). Por lo tanto, se tendrá una delimitación que servirá para evaluar la oferta hídrica obtenida hasta ese punto, para así poder comparar con la información disponible sobre datos observados de caudales medios anuales. La delimitación de la cuenca hasta este punto de cierre comprende un área de 32,530.00 hectáreas, es decir un 48.17% del área total de la cuenca. Luego de procesar la información sobre caudales mensuales para la estación señalada, y delimitar la cuenca, tomando la ubicación de esta estación como un punto de cierre, se obtuvo un valor de caudal medio anual observado de 40.89 (m³/s), que, para efectos de la validación, se buscó que el caudal simulado en este punto se acerque lo más posible al observado en este punto de medición.

Con el fin de encontrar el método con el cual se obtiene el caudal más cercano al observado, se

utilizaron los métodos de FAO Penman-Monteith, Thornthwaite y Holdridge en la simulación de oferta hídrica para condiciones de año medio; como resultado se obtiene la oferta hídrica media anual en cada método, la cual se evalúa para el punto de cierre de la cuenca en la estación con medición de caudales, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 7. CAUDALES MEDIOS ANUALES SIMULADOS BAJO DIFERENTES MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.

Método	Caudal (m ³ /s)	% Diferencia con caudal observado
FAO Penman-Monteith	29.19	40.1
Thornthwaite	33.92	20.5
Holdridge	30.21	35.3
Promedio	31.10	31.9

Fuente: Instituto Sinchi.

De acuerdo con los resultados, el método con el caudal simulado más cercano al observado, tomando como punto de cierre de la cuenca la estación Piedra Lisa II, es el método de Thornthwaite, con un caudal de 33.92 (m³/s), y un porcentaje de diferencia del 20.5 %, con respecto al caudal observado en dicho punto de la cuenca.

Dados estos resultados, vale la pena señalar, que, si bien se espera que el caudal simulado sea aún más cercano al observado, es importante tener en cuenta que se requieren más estaciones de precipitación en la parte alta de la cuenca, así como estaciones de temperatura media. De igual manera, sería ideal contar con una estación justamente en punto de cierre de la cuenca del río Mocoa, ya que es posible que una evaluación de caudales simulados pueda ser más cercana a posibles caudales observados en este punto.

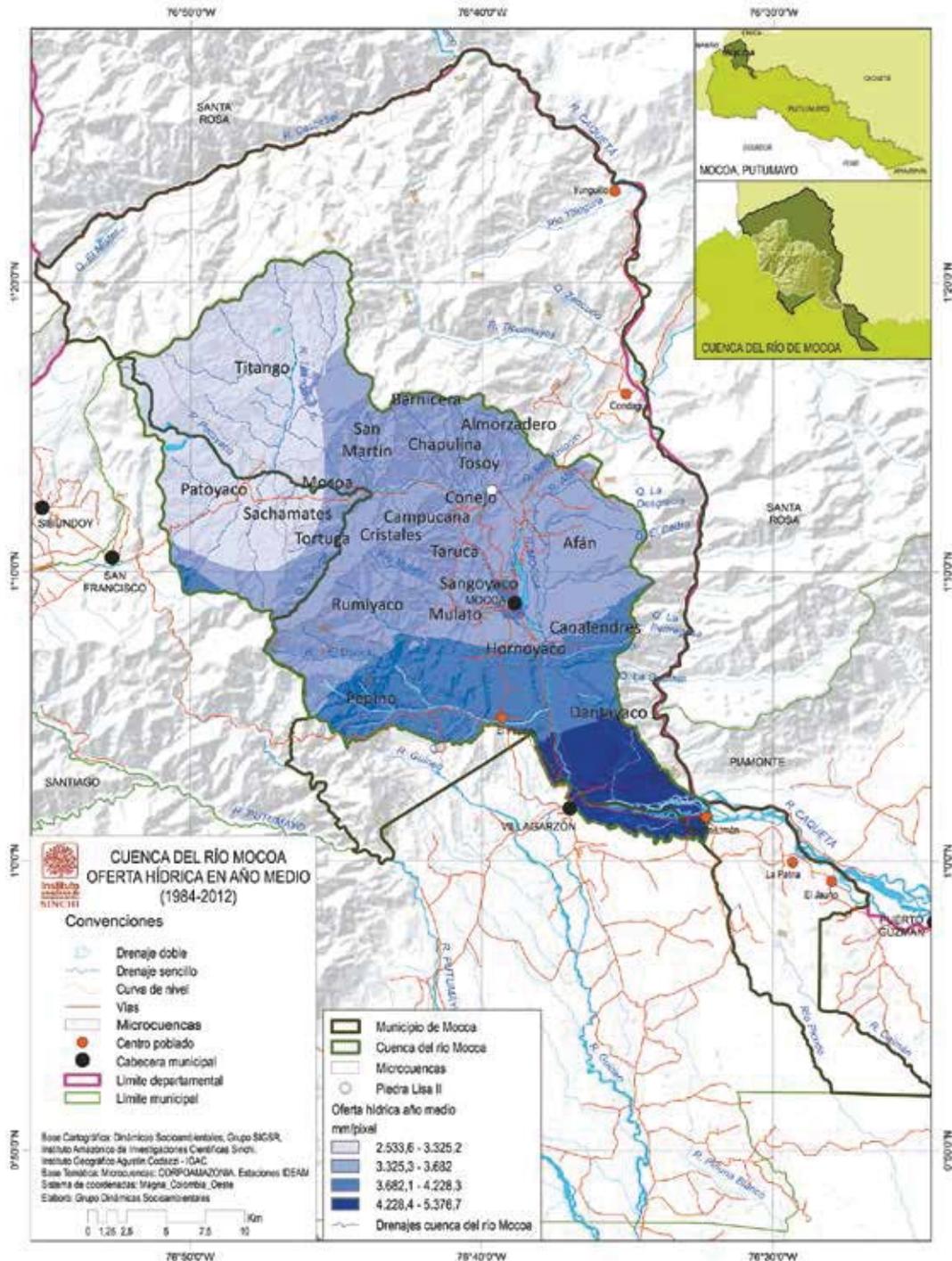
RESULTADOS

Rendimiento hídrico en escenario de año medio, seco y cambio climático

En año medio para la cuenca del río Mocoa, se tiene una esorrentía promedio anual (con una resolución de 30 metros) conformada por intervalos que van desde los 2533 hasta los 5376 mm*año⁻¹

(Mapa 4). Se puede observar una mayor escorrentía en la cuenca baja. Por otra parte, en condiciones de año seco, la oferta hídrica se reduce, dada la disminución en las precipitaciones y aumento en

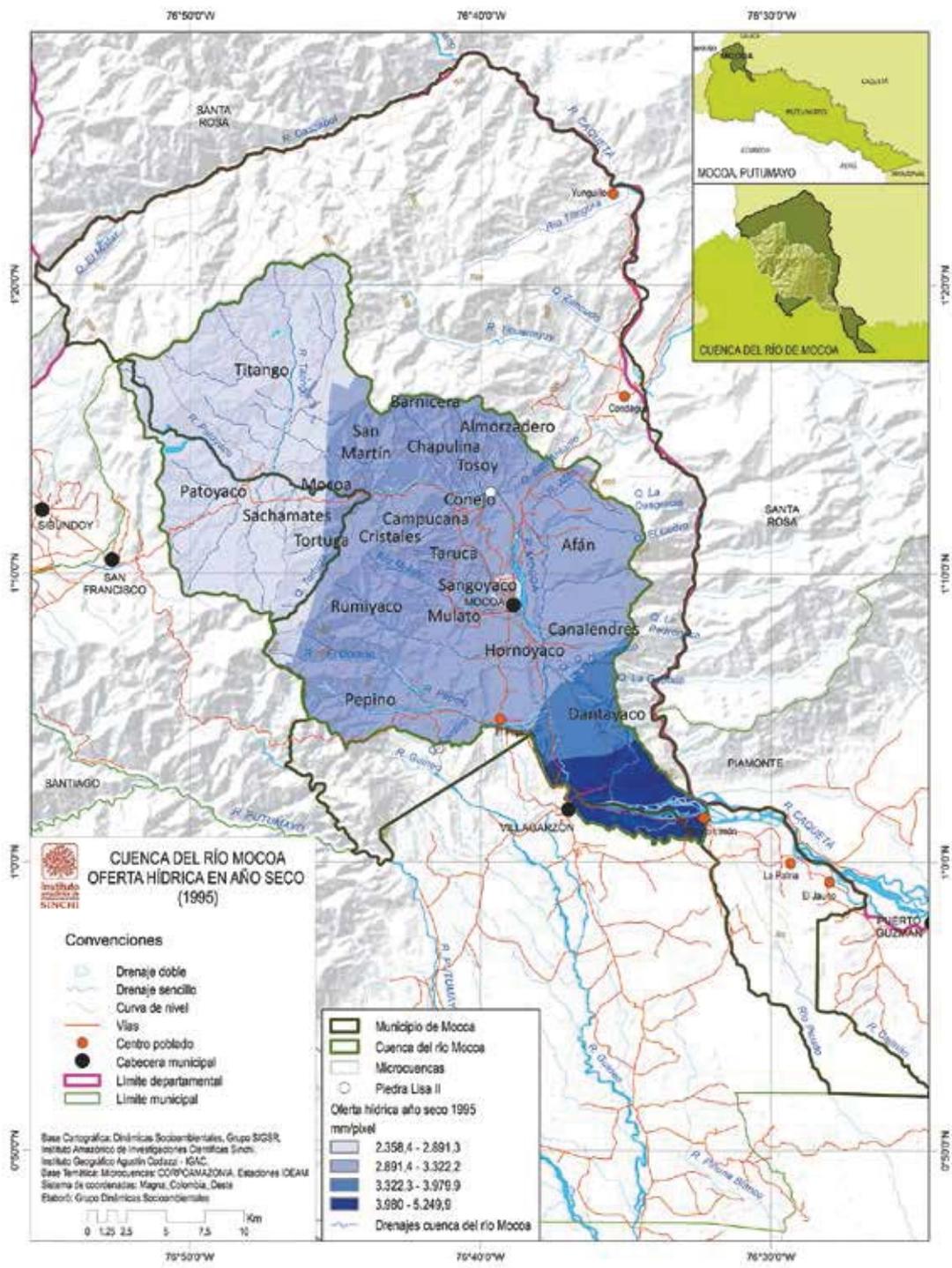
la temperatura. En este sentido, se tiene una escorrentía promedio anual conformada por intervalos que van desde los 2358 hasta los 5249 mm*año⁻¹. (Mapa 5).



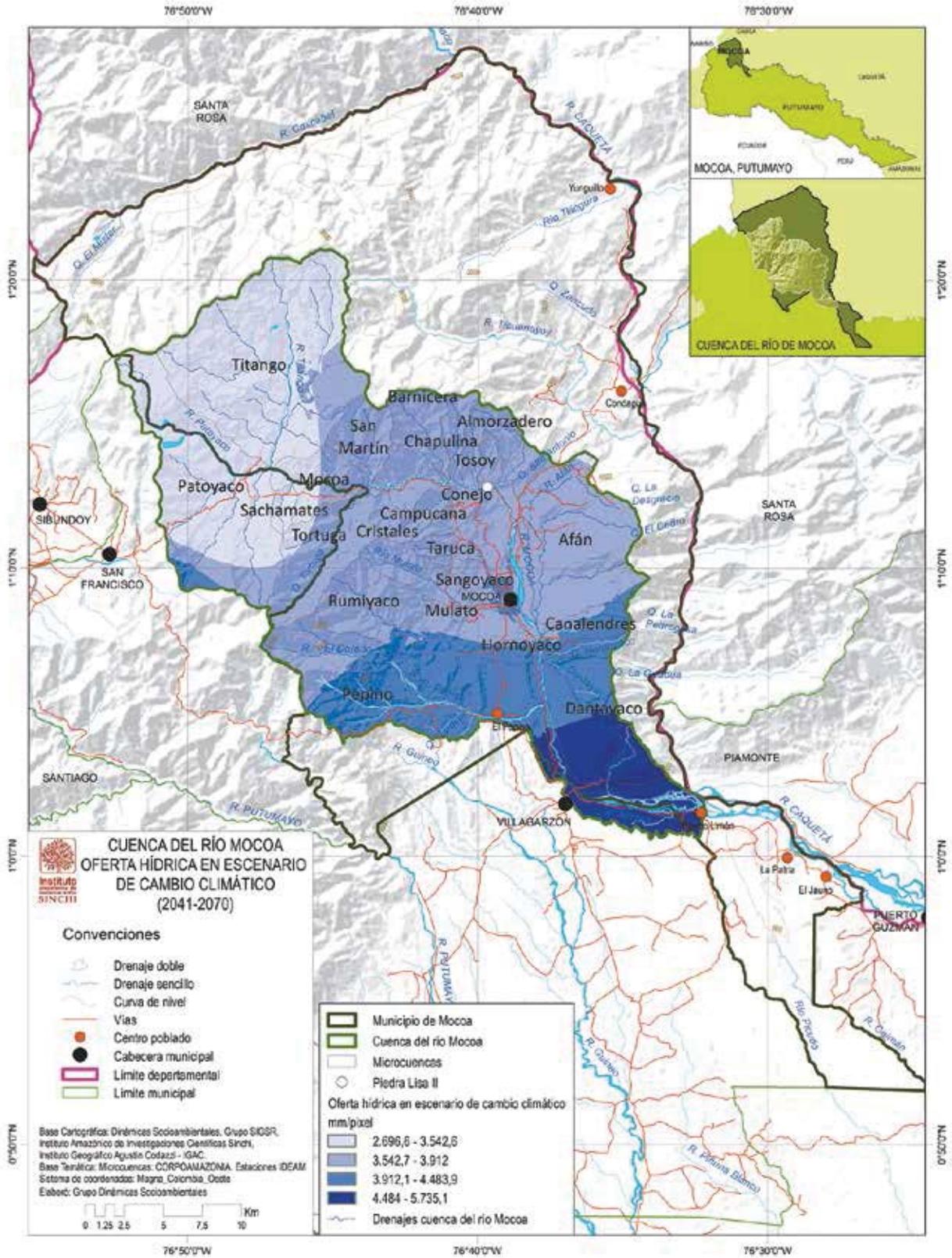
MAPA 4. OFERTA HÍDRICA EN AÑO MEDIO – CUENCA DEL RÍO MOCOA.

Bajo un escenario de cambio climático, la oferta hídrica en la cuenca del río Mocoa tiende a aumentar, esto debido a que en el periodo 2041-2070 se tendrían aumentos de la precipitación en un orden del 6,73%. De esta forma, se espera que a mayor

precipitación se presente una mayor escorrentía; por tanto, se observa una oferta hídrica en mm al año con intervalos que van desde los 2696 hasta los 5735 mm* año⁻¹. (Mapa 6).



MAPA 5. OFERTA HÍDRICA EN AÑO SECO.



MAPA 6. OFERTA HÍDRICA EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO (ENSAMBLE MULTIMODELO 2041-2070).

Retención de sedimentos

Para la presentación de los resultados de la modelación de este servicio ecosistémico, vale señalar que dicha retención de los sedimentos considerados en los mapas, comprende la cantidad de sedimentos retenidos en, $\text{Ton} \cdot \text{pixel}^{-1}$ (con una resolución de 30 metros) de acuerdo con la diferencia entre la cantidad de sedimentos entregados en una condición hipotética de suelo desnudo con respecto a las coberturas presentes en la cuenca.

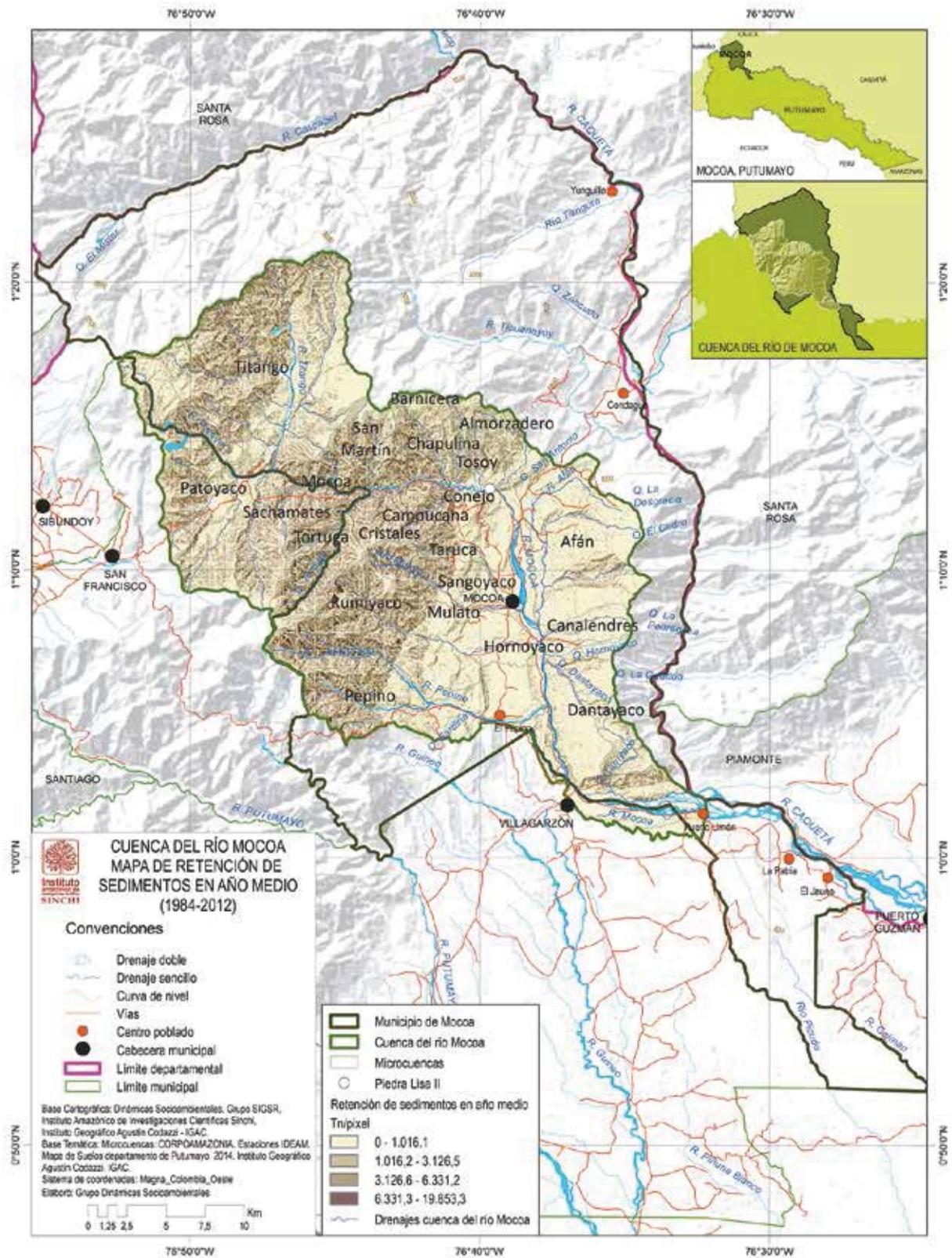
De esta forma, en condiciones de año medio se ve reducida en la cuenca baja, en donde se registran los menores valores de sedimentos retenidos con intervalos que pueden alcanzar hasta las 1.485 $\text{Ton} \cdot \text{pixel}^{-1}$, mientras que, en la cuenca media, zonas de la cuenca alta y parte de la cuenca baja se registran altos valores de retención de sedimentos, con intervalos que pueden alcanzar hasta las 19853 toneladas de sedimentos retenidos (Mapa 7). Por su parte, para las condiciones de año húmedo se presenta un incremento en la cantidad de sedimentos retenidos. Esto se explica por el aumento en las precipitaciones lo cual incrementa la erosión en la cuenca. De esta forma, en el mapa 8, se resalta como las coberturas boscosas retienen una mayor cantidad de sedimentos en un año con precipitaciones altas, obteniéndose valores que pueden alcanzar hasta los 25,641.71 $\text{Ton} \cdot \text{pixel}^{-1}$

Para el escenario de cambio climático tal y como ocurre en condiciones de año húmedo y año medio, en la zona alta y media de la cuenca, se presentan los mayores niveles de retención de sedimentos, con valores que pueden alcanzar hasta los 21,269.32 $\text{Ton} \cdot \text{pixel}^{-1}$.

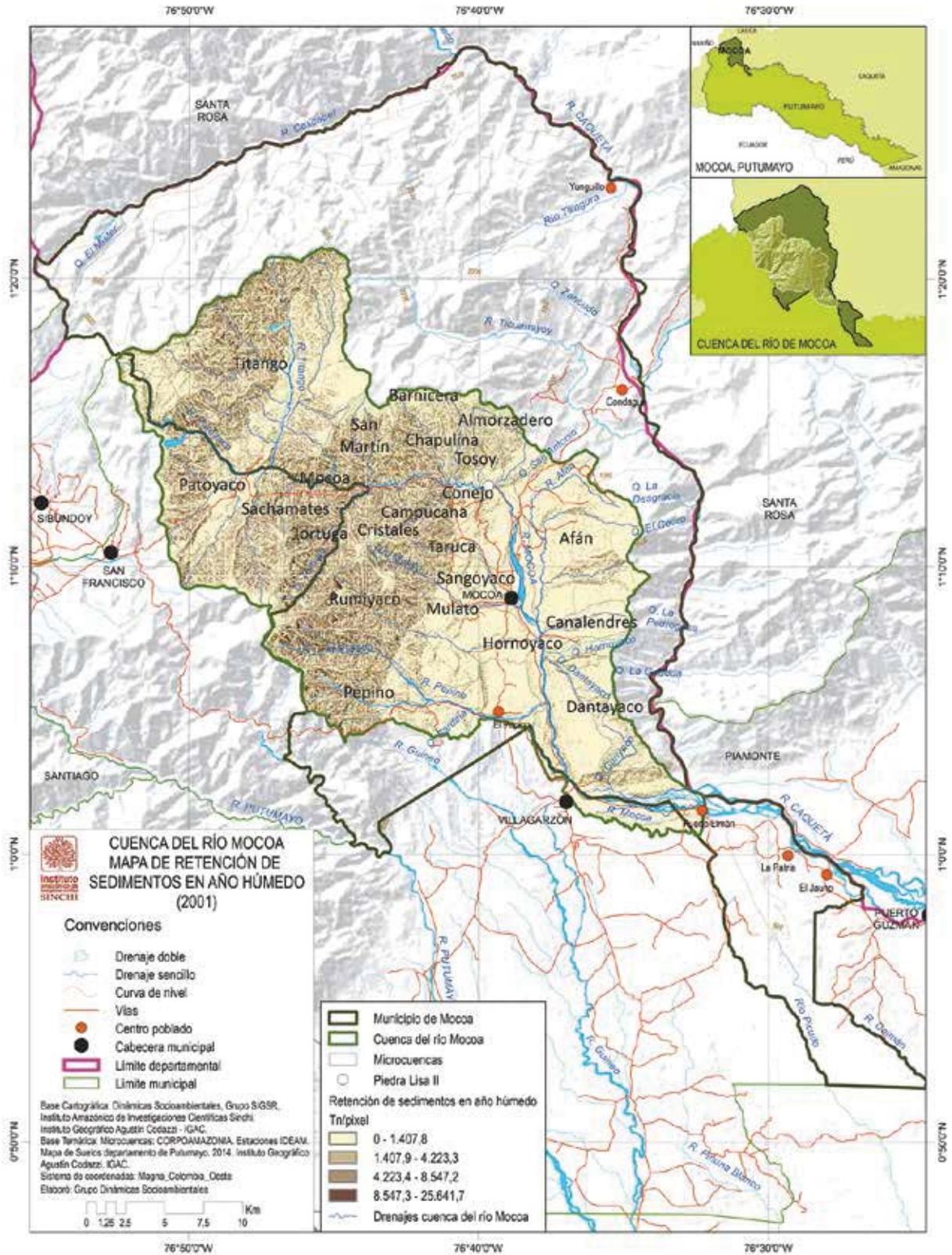
Simulación en áreas de importancia Estratégica

Como una forma de reconocer las posibles afectaciones ocasionadas por cambios en las coberturas de la tierra, se realizaron dos simulaciones en áreas de importancia estratégica, con relación a los sedimentos exportados hacia las fuentes hídricas. La selección corresponde a dos microcuencas catalogadas por Corpoamazonia como áreas de importancia estratégica para la provisión de agua en cantidad y calidad; sin embargo, también forman parte de intereses relacionados con la industria minera, ya que presentan títulos mineros y solicitudes mineras, que, de llevarse a cabo su explotación, ocasionarán algún tipo de cambio en las coberturas naturales presentes en la zona.

La aplicación de la simulación se realizó en la microcuenca del Almorzadero y la subcuenca del río Mulato, donde se evaluó el impacto en la cantidad de sedimentos exportados al remover la cobertura boscosa y cambiarla por tierras degradadas; lo anterior suponiendo que, de prosperar cualquier solicitud o título minero presente en estas microcuencas, se perderían las coberturas boscosas en el área total de estas fuentes hídricas. Esta suposición se manejó con el propósito de reconocer la acción de los bosques para evitar la pérdida de suelos, y así mismo, tener información sobre la cantidad de sedimentos exportados a las fuentes hídricas si no existieran las coberturas boscosas de estas microcuencas.



MAPA 7. RETENCIÓN DE SEDIMENTOS EN AÑO MEDIO – CUENCA DEL RÍO MOCOA.



MAPA 8. RETENCIÓN DE SEDIMENTOS EN AÑO HÚMEDO – CUENCA DEL RÍO MOCOA.

MICROCUCENCA ALMORZADERO

Dadas las condiciones de año medio en la microcuenca Almorzadero, se evidencian zonas en donde la cantidad de sedimentos exportados pueden alcanzar hasta los 82 Ton*pixel⁻¹, al sur de la microcuenca. Mientras que, en un escenario de pérdida boscosa, se presentan zonas en donde la cantidad de sedimentos exportados alcanza hasta los 7712 Ton*pixel⁻¹.

Finalmente, el cálculo de la cantidad de sedimentos exportados anualmente hacia las fuentes hídricas de la microcuenca se presenta en la tabla 8.

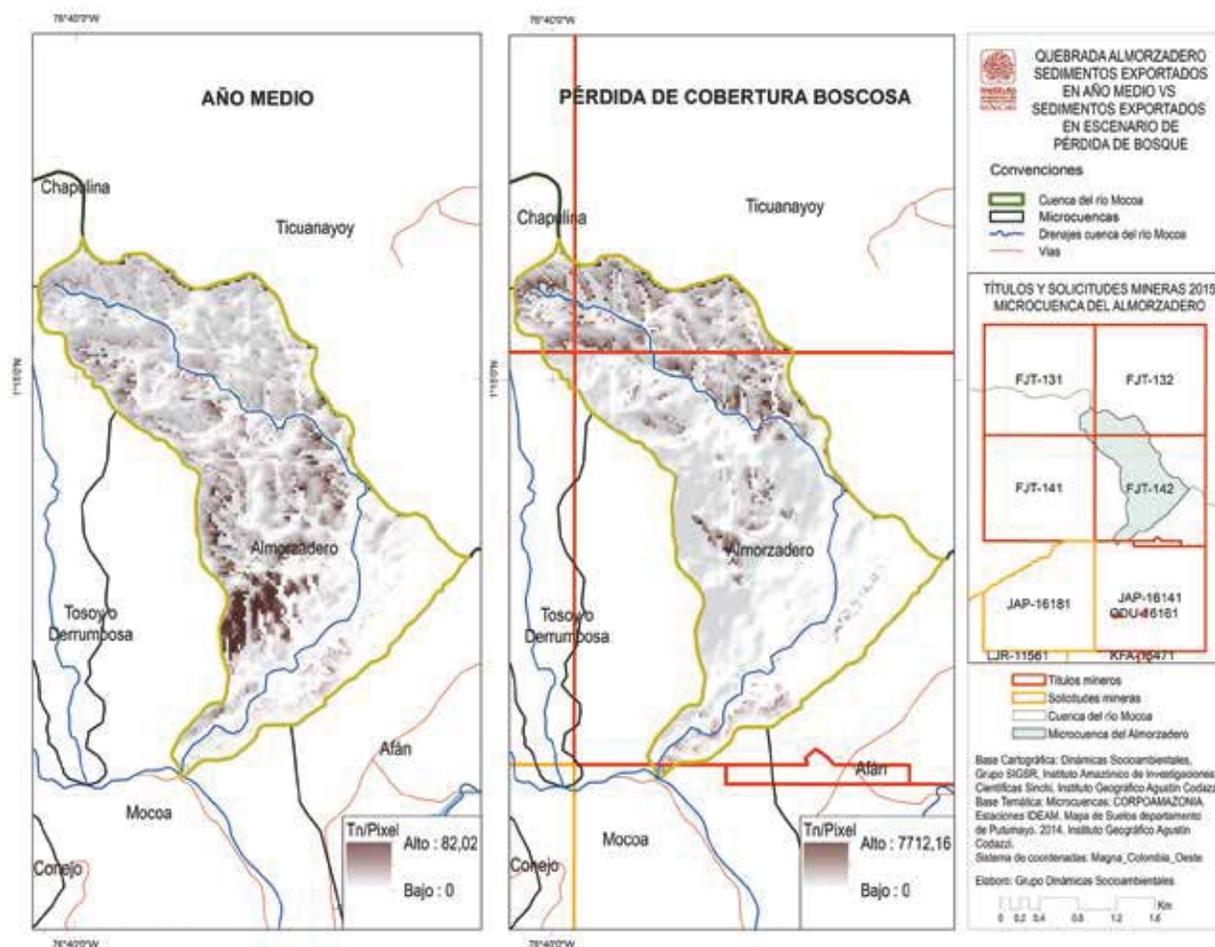
Como se observa al presentarse una pérdida de cobertura boscosa, la cantidad de sedimentos

exportados hacia las fuentes hídricas se incrementa significativamente, por lo cual es notable la acción de estas coberturas naturales en la prestación del servicio ecosistémico de retención de sedimentos al obtenerse una cantidad de sedimentos adicionales sin bosques de 4'123,873.0 Tn.

TABLA 8. COMPARACIÓN DE SEDIMENTOS EXPORTADOS EN AÑO MEDIO Y CON PÉRDIDA DE BOSQUES EN LA MICROCUENCA ALMORZADERO.

Escenario	Sedimentos exportados (Ton/año)
Año medio	18.421.0
Año medio con pérdida de cobertura boscosa.	4'142,294.0
Diferencia	4'123,873.0

Fuente: Cálculos grupo Dinámicas Socioambientales basados en salida de programa InVest.



MAPA 10. SEDIMENTOS EXPORTADOS EN AÑO MEDIO VS SEDIMENTOS EXPORTADOS EN ESCENARIO DE PÉRDIDA DE BOSQUE.

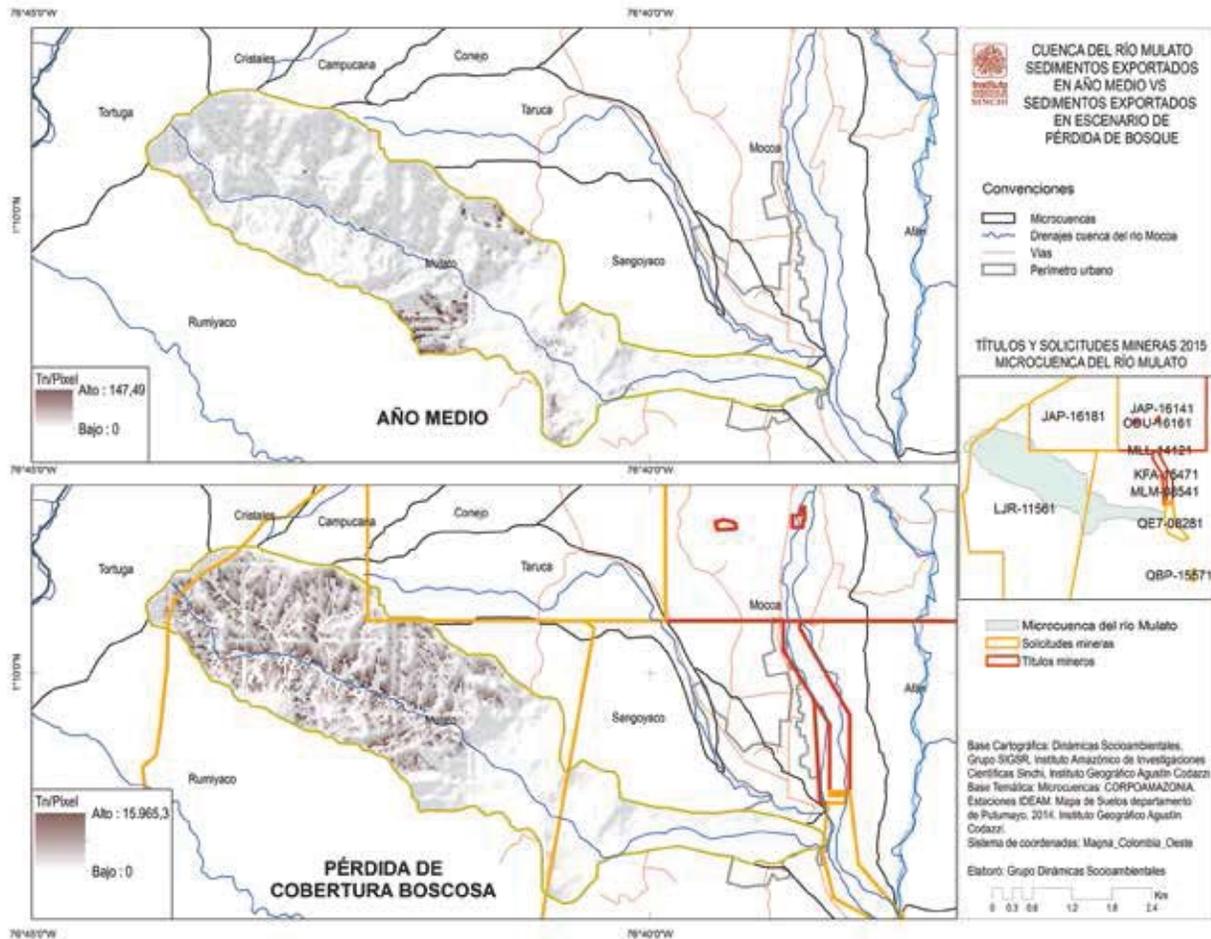
Subcuenca del río Mulato

El área total de la subcuenca del río Mulato es de 1719 Has aproximadamente, de las cuales 1304.27 se encuentran en solicitud para explotación minera, es decir el 75.87%. Ante esta situación, nace el interés de evaluar la magnitud de la afectación del ecosistema para evitar la pérdida de suelo por erosión, bajo el supuesto de que al otorgar títulos a esas solicitudes y hacerse efectiva la explotación minera, las coberturas boscosas desaparecerían.

En el siguiente mapa se consideran los resultados de la simulación del modelo de retención de sedimentos, en las condiciones descritas anteriormente para la subcuenca del río Mulato.

Dadas las condiciones de año medio en la subcuenca del río Mulato, se evidencian zonas en donde la cantidad de sedimentos exportados pueden alcanzar hasta los 147.49 Ton*pixel⁻¹, en la parte central de la microcuenca. Mientras que, en un escenario de pérdida boscosa, se presentan zonas en donde la cantidad de sedimentos exportados alcanza hasta los 15965.3 Ton*pixel⁻¹, en la parte alta de la subcuenca, justo donde se han reemplazado las coberturas boscosas por tierras degradadas.

Finalmente, el cálculo de la cantidad de sedimentos exportados anualmente hacia las fuentes hídricas de la subcuenca se presenta en tabla 9.



MAPA 11. SEDIMENTOS EXPORTADOS EN AÑO MEDIO VS SEDIMENTOS EXPORTADOS EN ESCENARIO DE PÉRDIDA DE BOSQUE – SUBCUEENCA DEL RÍO MULATO.

TABLA 9. COMPARACIÓN DE SEDIMENTOS EXPORTADOS EN AÑO MEDIO Y CON PÉRDIDA DE BOSQUES EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MULATO.

Escenario	Sedimentos exportados (Tn)
Año medio	55,863.0
Año medio con pérdida de cobertura boscosa.	25'816,694.0
Diferencia	25'760,831.0

Fuente: Cálculos grupo Dinámicas Socioambientales basados en salida de programa InVEST.

Como se observa, al presentarse una pérdida de cobertura boscosa, la cantidad de sedimentos exportados hacia las fuentes hídricas, se incrementa significativamente ya que en esta condición no se cuenta con la acción de las coberturas naturales en la prestación del servicio ecosistémico de retención de sedimentos.

Ante esta situación, es claro que ante una pérdida de cobertura boscosa se afectaría la regulación hídrica y aumentaría la cantidad de erosión que va hacia las fuentes hídricas afectando significativamente la calidad de agua para uso doméstico y agropecuario entre otros impactos. Un ejemplo claro consiste en la posible suspensión del suministro de agua por parte del acueducto municipal de Mocoa al aumentar la cantidad de sedimentos que deben ser tratados para asegurar la calidad del agua que viene de esta cuenca.

Es importante señalar que, si bien se presentan incrementos significativos en los sedimentos anuales para cada fuente hídrica, estos resultados deben compararse con datos observados con el fin de tener certeza sobre los mismos. Sin embargo, al no contar con este tipo de información en ninguna de las fuentes hídricas, es preciso recalcar que el alcance de estas simulaciones corresponde a fines comparativos sobre el efecto aproximado que se tendría al no contar con ningún tipo de bosques en estas fuentes hídricas. De esta manera, vale la pena mencionar que ante la posibilidad de usar este tipo de herramientas de modelación que nos permiten conocer mejor los servicios ecosistémicos de la región amazónica, es necesario fortalecer la toma y recolección de información climática, la cual es sumamente valiosa, no solo para estos análisis sino también para muchos otros ejercicios en donde se analizan las implicaciones de la variabilidad climática y el cambio climático.

LIMITACIONES

La principal limitación del estudio corresponde a la falta de información sobre caudales medios mensuales y sedimentos a la salida de la cuenca del Río Mocoa, a fin de permitir una validación más precisa de los resultados generados por los modelos. Por lo tanto, es importante señalar que los resultados obtenidos se deben considerar como una aproximación que permite comparar tendencias de servicios ecosistémicos hidrológicos en la cuenca como respuesta a condiciones climáticas y cambios en la cobertura del suelo.

Con el fin de incrementar la certeza de los ejercicios de modelación de servicios ecosistémicos, es fundamental aumentar el número de estaciones meteorológicas, y así mismo, contar con mediciones históricas de caudales y sedimentos, los cuales permitan obtener un panorama de información confiable que robustezca los análisis de servicios ecosistémicos tanto en esta región como en las demás zonas de la Amazonía Colombiana, las cuales presentan limitaciones en la cantidad de estaciones y registros históricos de variables climáticas.

Finalmente, vale la pena recalcar que los resultados obtenidos para las áreas de importancia estratégica de la Quebrada Almorzadero y el Río Mulato, únicamente obedecen a un interés comparativo, su alcance esta dado con el fin de identificar posibles tendencias y resultados frente a una condición que implicar la eliminación total de todos los bosques. Sin embargo, no se cuentan con mediciones de sedimentos que permitan contrastar los resultados del modelo con información observada. En este sentido, los resultados de la modelación se consideran como una medida aproximada del incremento en sedimentos anuales en caso tal de no contar bosques en estas fuentes hídricas, por lo cual será necesario realizar un ejercicio de comparación cuando se cuente con series históricas observadas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo realizó un análisis de las dinámicas espaciales y temporales resultantes del proceso de ocupación y poblamiento del municipio de Mocoa. Este estudio señala en cifras el avance del anillo de

poblamiento sobre un territorio de gran potencial hídrico, en el que confluyen intereses económicos por la extracción de minerales (cobre, oro, molibdeno), materiales de construcción e hidrocarburos, evidenciando el conflicto ambiental que se vislumbra frente a los títulos y solicitudes mineras, así como los bloques petroleros que se traslapan con áreas protegidas a nivel local y resguardos indígenas.

En consecuencia, el trabajo tiene un especial énfasis en un ejercicio de caracterización de los servicios hidrológicos de regulación hídrica, rendimiento hídrico y retención de sedimentos en la cuenca alta del río Mocoa. Para la modelación biofísica se utilizó la herramienta de modelación de servicios ecosistémicos InVEST en los escenarios actual, seco, cambio climático y posible pérdida de los servicios ante cambios de uso del suelo por el desarrollo de actividades mineras.

Dentro de los resultados de modelación de los servicios ecosistémicos hídricos contemplados, se destaca que aunque la cuenca cuenta con un estado superavitario hídrico en su relación oferta y demanda, se debe considerar que en los escenarios de variabilidad climática (fenómeno del niño) y cambio climático las condiciones actuales se ven afectadas de manera sustancial y se deberá entender el relacionamiento de las poblaciones vecinas con las regiones superavitarias en agua como Mocoa. En el caso concreto de un escenario de niño, este estudio consideró el año de 1995 como referencia. Sin embargo valdría la pena considerar la modelación del fenómeno del niño del 2015, el cual se cataloga como el niño más fuerte que ha sucedido por lo menos en los últimos 30 años.

Los resultados muestran como las zonas bajas de la cuenca presentan los mayores niveles de producción de agua, lo cual es natural al reconocer que las coberturas boscosas que se encuentran en la parte alta de la cuenca retienen el agua y permiten su escurrimiento lentamente. De igual forma, en la cuenca baja se reciben todos los aportes de las fuentes hídricas por lo cual es de esperar que presente una condición más significativa en términos de oferta hídrica.

Es interesante considerar las tendencias de los resultados obtenidos para la cuenca del río Mocoa,

en la medida en que para la parte alta, que es donde se encuentra la mayor cobertura boscosa, se estaría presentando una menor oferta hídrica, mientras que para la cuenca media y baja aumenta. Esto se explica teniendo en cuenta que todos los datos que recibe el modelo son anuales y en tal sentido, se espera que, en un paisaje con menor área de cobertura boscosa, cuyas raíces absorben gran cantidad de agua y cuenta con una alta evapotranspiración, exporte más agua en un periodo anual. (TNC, 2011). Esto significa que el beneficio de los bosques se orienta más hacia la regulación hídrica, ya que en una zona que presenta mayor cobertura boscosa existe una producción de agua más balanceada a nivel anual. Por lo tanto, durante el verano se favorece la oferta hídrica suficiente, mientras que en invierno se disminuye la posibilidad de inundaciones. Además, los bosques reciclan entre el 20 y 25% de las lluvias que recibe, y el aire que viaja por cobertura boscosa puede generar el doble de lluvia que el aire que transita por tierra deforestada. (CIAT, 2013).

Además de lo anterior, en términos absolutos, es importante considerar que se reporta una disminución en el rendimiento hídrico en año seco con respecto a un año medio, con porcentajes de reducción que pueden alcanzar el 47%; aunque aun así la situación puede ser superavitaria, la vulnerabilidad no deja de estar a la vuelta de la esquina si se considera el crecimiento poblacional, el cambio de temperatura derivado del cambio climático y sobretodo lo que ocurre en departamentos aledaños como Caquetá donde las condiciones de disponibilidad hídrica no son tan holgadas como las de Mocoa. En este contexto, de acuerdo con la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, el departamento del Caquetá podría presentar una reducción sustancial en sus precipitaciones para el período de 2011-2040 (18%) que lo ubican en una situación deficitaria; y un cambio en la temperatura media que lo pone en el máximo rango de temperatura “alto” con un cambio medio de 2.2 grados centígrados, a diferencia del departamento de Putumayo, en donde se tendrían aumentos de temperatura en 1.5°C, y aumentos de precipitación del 6.73%.

Aunque a simple vista el escenario de cambio climático parece ser alentador (se registra un aumento del rendimiento hídrico de hasta 11%) para el municipio, es importante recalcar que la temperatura también

aumenta en 1,5°C, pero con las tendencias de los cambios en la cobertura y uso del suelo para Mocoa, esta oferta hídrica podría disminuir. De igual manera, vale la pena señalar que en condiciones de mayor precipitación aumenta el riesgo de las inundaciones y los eventos de remoción en masa, lo que se traduce en pérdida de suelo por erosión, mayores niveles de sedimentación, entre otros aspectos que afectan la calidad de vida de la población, En este sentido si la cuneca cuenta con una adecuada cobertura boscosa, se favorece la regulación hídrica en la medida en que se reduce la amplitud de los picos por variabilidad climática, lo que se traduce que en época seca se favorezca un caudal constante y en época de inviernos se reduzcan las posibilidades de crecidas.

Se destaca que la herramienta de mapeación y modelación de Servicios Ecosistémicos InVEST, tiene gran potencial de aplicación en la identificación de áreas estratégicas para esquemas de Pagos por Servicios Ambientales, en concordancia con las obligaciones que tienen los municipios y autoridades ambientales para su identificación y conservación estratégica. Este tipo de modelaciones permitiría la inversión más costo efectiva de los recursos escasos del instrumento. Por ejemplo: Mocoa tiene un potencial de recursos de hasta 279 millones anuales por concepto del 1% de sus ingresos corrientes, los cuales se pueden invertir en la compra de predios o financiación de esquemas de PSA para garantizar la provisión del recurso hídrico en las áreas de importancia estratégica.

Así mismo dentro de las potencialidades de valoración económica que se presentan con la herramienta, considerando un contexto de cuenca, está la identificación de aquellas áreas estratégicas para nuevos acueductos regionales, de cara a la demanda futura de agua; este ejercicio necesitaría de información para además demostrar aquellos costos evitados que hoy día el municipio se ahorra por mejores coberturas de bosque.

Otro de los posibles métodos de valoración económica aplicables corresponde al método de valoración contingente usado como parte de un proceso de concientización en la planificación del territorio, en el cual la población local visualice y se informe de las afectaciones potenciales que habrían de tener lugar por los cambios de uso del suelo ante las

actividades mineras, de infraestructura, crecimiento urbano desordenado y en general cambios de uso del suelo.

Se hace énfasis en que lo más importante de este tipo de ejercicios es que la gente conozca la afectación de los servicios ecosistémicos implicados y se busquen alternativas en las cuáles la conservación genere rentas a nivel local. Los resultados de valoración son una primera base para la estimación de las afectaciones al bienestar social por la pérdida de servicios ecosistémicos cuando aparentemente no existe escasez de los mismos como ocurren en el municipio de Mocoa gracias a sus condiciones superavitarias de agua.

Finalmente y como parte de las posibilidades de articulación con instrumentos económicos se destacan las alternativas de compensación, de acuerdo con los lineamientos presentes en el Manual de Compensaciones por Pérdida de Biodiversidad y la aplicación del Decreto 953 de 2013, para la conservación de áreas estratégicas de provisión hídrica de acueductos municipales y departamentales. Es por esto que uno de los aportes de este estudio es la de proponer una metodología con aplicación en el entorno amazónico para la identificación de dichas áreas. De esta manera, un paso a seguir es el de la cuantificación de los costos por hectárea para los ejercicios de conservación de estas áreas y que contemple costos de oportunidad a compensar. Queda por resolver la pérdida de servicios ecosistémicos en aquellas áreas que entran en conflicto con proyectos minero energéticos y de infraestructura.

AGRADECIMIENTOS

Al Equipo de WWF Colombia, especialmente a Cesar Suárez, Johanna Prüssmann y Daniel Ortega por la capacitación brindada para el uso de la herramienta InVEST.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corpoamazonia por proporcionar la información necesaria para el desarrollo del estudio, a través de sus importantes investigaciones que permiten conocer más sobre la riqueza y potencialidad de los servicios ecosistémicos en la Amazonía Colombiana.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Mocoa. 1997. *Plan Básicode Ordenamiento Territorial*. Mocoa–Putumayo.
- Arnoldus, H. (1997). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin 34*: 39-51.
- Alcaldía de Mocoa. 2012. Plan de Desarrollo Municipal “Si hay futuro para Mocoa” 2012-2015. Mocoa: Alcaldía Municipal de Mocoa.
- Brondízio, E., & May, P. H. 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity : The Ecological and Economic Foundations (TEEB D0) Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation How the TEEB framework can be applied : The Amazon case (pp. 1–17).
- CIAT. 2013. Agenda de Seguridad para la Amazonía Fortaleciendo el nexo entre la seguridad hídrica, energética, alimentaria, y de la salud en la región y más allá. Global Canopy Programme–CIAT.
- Corpoamazonia. 2015. *Sitios de interes turístico*. Mocoa–Putumayo: Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia.
- FAO. 2006. *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Hoyos, N., Waylen, P., & Jaramillo, R. 2005. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 177-191.
- IDEAM. 2010. *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. 2015. *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá D.C.: Instituto de Histología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- INSTITUTO AMAZÓNICO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS SINCHI. 2007a. Hoja metodológica del indicador Porcentaje de cambio de la población. Ajustado por: Mario Orlando López Castro. Bogotá, junio de 2007. Versión 1.03.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI IGAC. 2012. Atlas de la Distribución de la Propiedad Rural en Colombia. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia, 2012. 540 p., ils. Mapas a color, 1 CD ROOM (Anexos Estadísticos).
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI IGAC. 2012. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Putumayo. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IAVH. 2012. Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos. Vasa. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- IDEAM. 2010. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- TNC. 2011. Impacto del cambio de coberturas en el rendimiento hídrico y la retención & producción de sedimentos en 5 subcuencas de la cuenca baja del río Paute: análisis de escenarios utilizando el modelo InVEST. The Nature Conservancy.
- Salazar Cardona, C., & Riaño Umbarila, E. 2016. Perfiles urbanos en la Amazonia Colombiana. (S. M. González, Ed.) Bogotá D.C. Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas «SINCHI».
- Sánchez Rodríguez, I., & Corredor Llano, X. 2013. *Manual de usuario del software de inferencia estadística para el análisis de teleconexiones “JAZIKU”*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM–Subdirección de Meteorología.
- Sharp, R., Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S., Chaplin-Kramer, R., . . . Bierbower, W. 2015. InVEST +VERSION+ User’s Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Wisshmeier, W., & Smith , D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, A. guide to conservation planning. *USDA Handbook*, N° 537, 58 p.