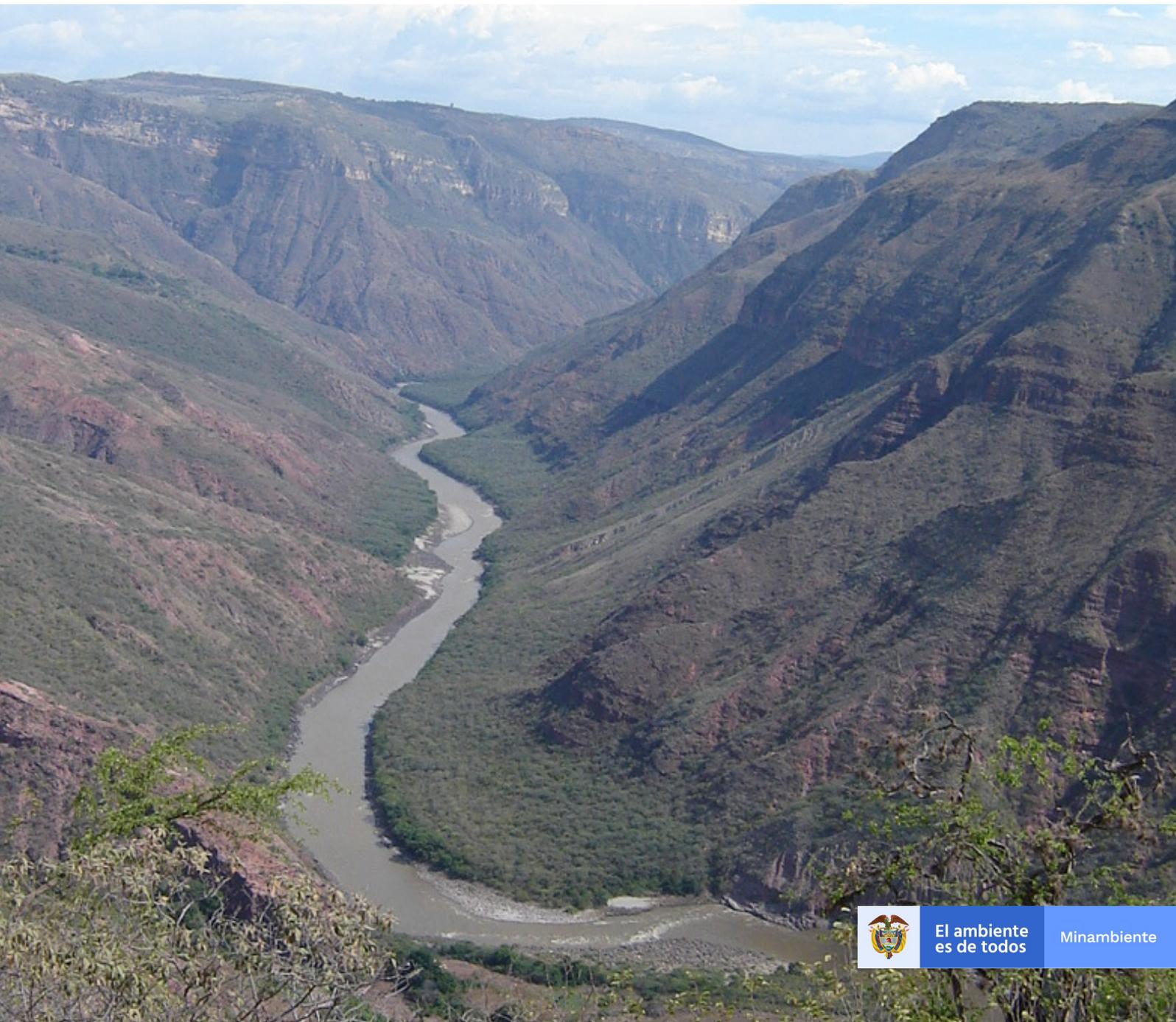




SUBDIRECCIÓN DE SOSTENIBILIDAD Y NEGOCIOS AMBIENTALES

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS DEL PARQUE NACIONAL NATURAL SERRANÍA DE LOS YARIGUIES- CUENCA DEL RIO SOGAMOSO: SECTOR HIDROENERGÉTICO



El ambiente
es de todos

Minambiente

**VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS
DEL PARQUE NACIONAL NATURAL YARIGUIES- CUENCA DEL RIO SOGAMOSO: SECTOR
HIDROENERGÉTICO**



PRESENTADO POR:

MAYRA ALEJANDRA GONZÁLEZ ARCHILA

CON APOYO DE: MIGUEL ÁNGEL BEDOYA

Subdirección de Sostenibilidad y Negocios Ambientales

**PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA
SUBDIRECCIÓN DE SOSTENIBILIDAD Y NEGOCIOS AMBIENTALES
BOGOTÁ D.C.**

2020

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	5
ÁREA DE ESTUDIO.....	6
IDENTIFICACIÓN DE SECTORES BENEFICIARIOS	8
SECTOR ENERGÉTICO: CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO	8
SISTEMAS DE ACUEDUCTO	9
SECTOR AGROPECUARIO	10
SECTOR MINERO	11
HIDROCARBUROS	11
MINERIA.....	11
METODOLOGÍA DE VALORACIÓN.....	12
SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS:	12
IMPLICACIONES PARA LA HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO.....	13
MODELACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO	14
RESULTADOS	17
ANÁLISIS EXPLORATORIO DE SERIES DE TIEMPO	17
ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD.....	17
ANÁLISIS DESCRIPTIVO	20
ANÁLISIS CONFIRMATORIO DE SERIES DE TIEMPO	26
PRUEBAS ESTADÍSTICAS.....	27
ESTACIONES SELECCIONADAS	28
VALORACIÓN BIOFÍSICA- ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS RETENIDOS.....	31
DELIMITACIÓN DE CUENCA DE REFERENCIA	31
MODELACIÓN SEDIMENTOS- INVEST	33
INSUMOS PARA LA MODELACIÓN	33
RESULTADOS: CÁLCULO DE SEDIMENTOS RETENIDOS Y EXPORTADOS	40
VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS	46
METODO DE VALORACIÓN ECONÓMICA:.....	46
CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de insumos.....	15
Tabla 2. Estaciones hidrometeorológicas en Cuenca del río Sogamoso	17
Tabla 3. Información climática en estaciones objeto de estudio.....	19
Tabla 4. Información precipitación estaciones/mes, en mm.....	20
Tabla 5. Resultado de pruebas estadísticas	27
Tabla 6. Estimaciones del factor R de erosividad en escenarios climáticos.....	36
Tabla 7. Tabla biofísica	40
Tabla 8. Costos asociados a Dragados de sedimentos por m ³ , valor a 2020	47
Tabla 9. Sedimentos exportados evitados por coberturas del PNN Serranía de los Yariguíes	48

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Implicaciones de la sedimentación para embalses	13
Gráfico 2. Insumos para modelo de retención de sedimentos.	15
Gráfico 3. Gráfico de doble masa.....	21
Gráfico 4. Series de tiempo diarias en las estaciones	22
Gráfico 5. Gráficos de caja y bigotes	24
Gráfico 6. Ajustes a series de tiempo.....	28
Gráfico 7. Sedimentos en estación Puente Comuna-promedio mensual 1900-2010 (1000Ton/mes)	31
Gráfico 8. Escenarios de modelación	33
Gráfico 9. Sedimentos transportados en estación Puente Comuna	41
Gráfico 10. Sedimentos Retenidos asociados al r PNN Yariguíes.....	41
Gráfico 11. Sedimentos exportados.....	42
Gráfico 12. Sedimentos exportados bajo un escenario de transformación de coberturas de bosque denso a pasto	45

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación cuenca del Río Sogamoso.....	6
Mapa 2. Coberturas en la cuenca del Río Sogamoso	7
Mapa 3. Hidrosogamoso en cuenca del río Sogamoso	8
Mapa 4. Cobertura de acueducto en la cuenca del río Sogamoso	9
Mapa 5. Estaciones hidrometeorológicas IDEAM ubicadas en la cuenca del río Sogamoso	18
Mapa 6. Delimitación Cuenca Río Chucurí.	32
Mapa 7. Coberturas en cuenca del río Chucurí.....	34
Mapa 8. Estaciones utilizadas para el análisis de precipitación.....	35
Mapa 9. Mapeo de erosividad de la lluvia en diferentes escenarios.....	37
Mapa 10. Unidades de suelos en la zona objeto de estudio.....	38
Mapa 11. Mapeo de erodabilidad del suelo	39
Mapa 12. Mapeo de sedimentos exportados	43
Mapa 13. Mapeo de sedimentos retenidos	44

INTRODUCCIÓN

El reconocimiento de los servicios ecosistémicos que proveen las áreas protegidas contribuye a fortalecer el relacionamiento con diferentes sectores estratégicos y a su vez mejorar la gestión sobre las áreas protegidas. En este sentido, la valoración de los servicios ecosistémicos cobra cada vez más fuerza como herramienta institucional para la toma de decisiones.

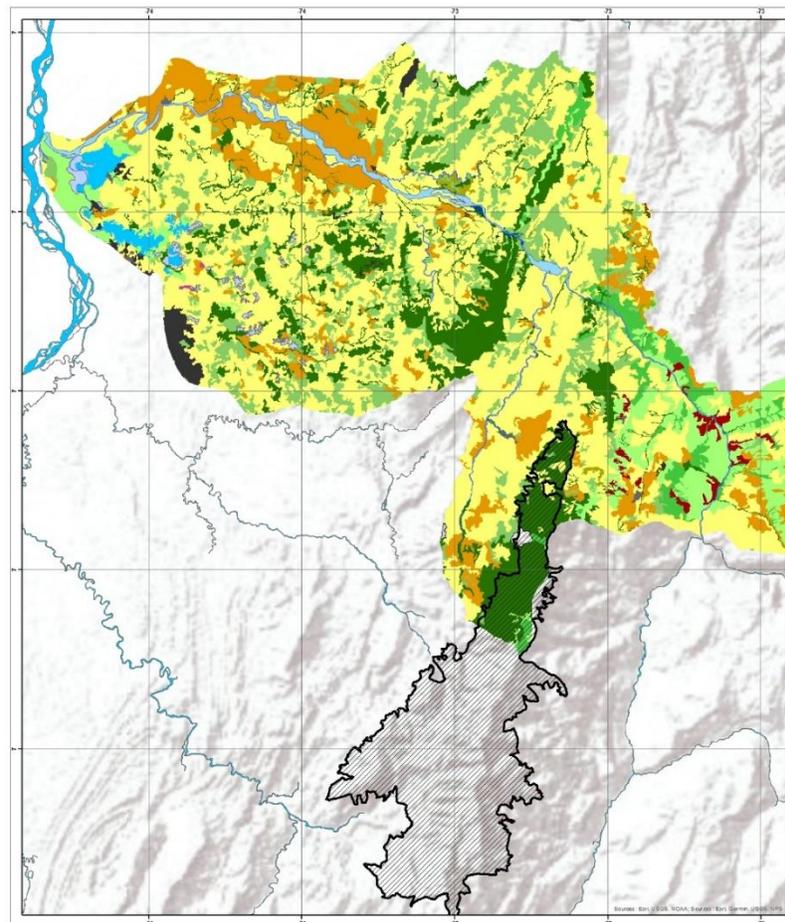
En el siguiente estudio se presentan los resultados de la valoración económica del servicio de retención de sedimentos del Parque Nacional Natural (PNN) Serranía de los Yariguíes identificando como principal actor beneficiario el sector hidroenergético. El proceso metodológico del presente estudio, parte de una valoración biofísica del servicio ecosistémico, en donde se cuantificaron los sedimentos que son retenidos por las coberturas protegidas en el PNN Serranía de los Yariguíes, a partir de un modelamiento espacial y cuantitativo a través del software Invest que permite calcular la carga de sedimentos enviados a la corriente a una escala de tiempo anual, así como la cantidad de sedimentos erosionados en la cuenca y retenidos por la vegetación. Posteriormente y a través del método de costos evitados se calcula el beneficio económico que representa al PNN Serranía de los Yariguíes, reflejando los costos que se evitan a la hidroeléctrica, como principal actor beneficiario, frente al manejo de los sedimentos que son retenidos por las coberturas del área protegida y que mejoran la calidad del agua, el desgaste de los equipos y la vida útil del embalse.

OBJETIVOS

- Estimar la cantidad de sedimentos retenidos por las coberturas protegidas del Parque Nacional Natural Serranía de los Yariguíes para tres escenarios climáticos y un escenario de transformación de coberturas.
- Valorar el aporte económico que representa el PNN Serranía de los Yariguíes en función de la retención de sedimentos al sector energético

En el sector sur de la cuenca (cuenca alta) se localiza el Parque Nacional Natural Serranía de los Yariguíes, el cual cuenta con una extensión de 59.698 Ha, de las cuales el 18,52% se encuentran al interior de la cuenca del río Sogamoso. De acuerdo con el siguiente mapa de coberturas se tiene que, hay una presencia importante de ecosistemas transformados, en donde las áreas de pastos y con cultivos son las más significativas, por otro lado, respecto a los bosques se observa que hay una porción que se localizan en la cuenca media y una porción mayor dentro del PNN Serranía de los Yariguíes, lo que refleja la importancia del área protegida para la cuenca, dado el soporte en términos de ecosistemas y servicios ecosistémicos que brinda a la cuenca y a los actores que se localizan en ella y en la zona aledaña.

Mapa 2. Coberturas en la cuenca del Río Sogamoso



Coberturas en cuenca del río Sogamoso

0 3,25 6,5 13 19,5 26 Kilometers
1:250.000

Parques Nacionales Naturales de Colombia

MINAMBIENTE

Leyenda			
Coberturas			
cobertura_			

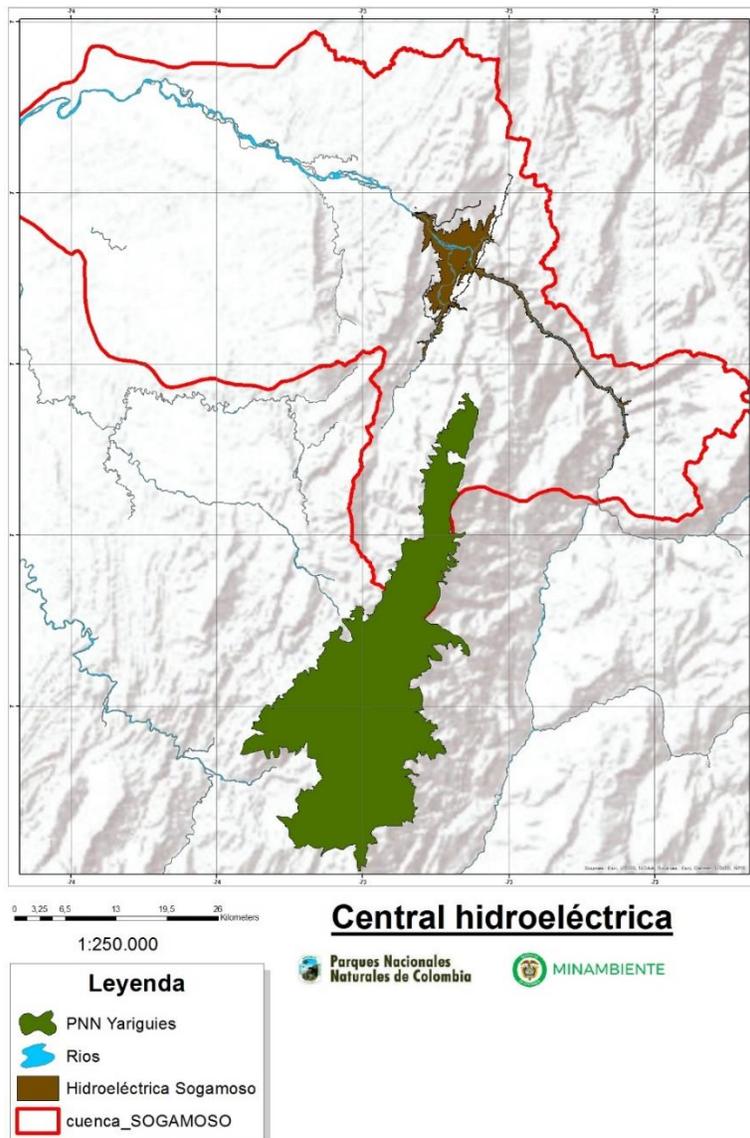
Fuente: este estudio

IDENTIFICACIÓN DE SECTORES BENEFICIARIOS

A partir del Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca del Río Sogamoso, se identifican los principales sectores beneficiarios o usuarios directos del recurso hídrico de la cuenca, tal y como se muestra a continuación:

SECTOR ENERGÉTICO: CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO

Mapa 3. Hidrosogamoso en cuenca del río Sogamoso

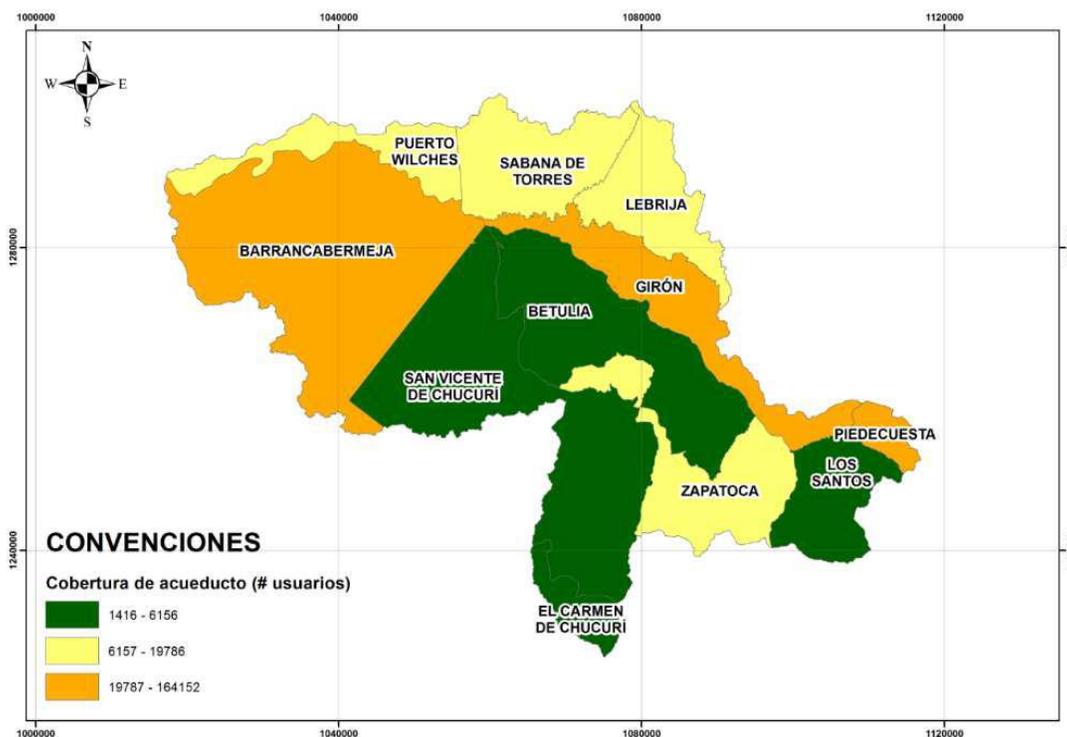


Fuente: este estudio

En el centro de la cuenca del río Sogamoso se localiza la central hidroeléctrica Hidrosogamoso, con la presa Latora y el embalse Topocoro. La central es la cuarta hidroeléctrica del país, con una capacidad instalada para producir el 8,3% de la energía anual del país y es operada por ISAGEN. Esta hidroeléctrica posee las tres unidades de generación más grandes de Colombia, con 820 MW de capacidad instalada y una generación media anual de 5.056 GWh/año, siendo la cuarta hidroeléctrica con mayor capacidad instalada en el país que incrementará la producción de energía alrededor del 60%. Se localiza en el cañón de la Serranía de la Paz en jurisdicción de los municipios de Girón, Betulia, Zapatoca, Los Santos, Lebrija y San Vicente de Chucurí. El caudal medio anual en el sitio de presa es de 471,5 m³/s y el embalse tiene un volumen máximo de 4.800.000.000 m³, ocupando una extensión de 7.000 Ha aproximadamente.

SISTEMAS DE ACUEDUCTO

Mapa 4. Cobertura de acueducto en la cuenca del río Sogamoso



Fuente: POMCA

El servicio de acueducto en el área urbana de los municipios que se encuentran en la cuenca tiene una cobertura considerable, en donde el mayor porcentaje se encuentra en Barrancabermeja, Piedecuesta y Girón.

- Barrancabermeja: en su área rural no reportó gran cantidad de sistemas de acueducto que se abastecen directamente del río Sogamoso en proporción a su tamaño. Las principales fuentes de abastecimiento son cuerpos de agua aledaños y cisternas dispuestas por la comunidad
- Betulia: el servicio de acueducto es administrado por la Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios en centros poblados, donde el 80% de la población está conectada al sistema. En los demás sectores del área rural, se cuenta con acueductos veredales administrados por las Juntas de Acción Comunal que toman el agua de nacimientos.
- San Vicente de Chucurí: la cobertura en acueducto reportada al Sistema Único de información SUI por la alcaldía, indican que en el área rural la cobertura de acueducto es tan solo del 26,65%.
- Lebrija: cuenta con una cobertura del 41,5%, los pobladores de la zona rural toman el agua principalmente de aljibes, nacientes y quebradas cercanas y la conducen a través de ductos y mangueras hasta sus viviendas
- Girón: el 51,9% del total de las viviendas obtiene el agua fuera del lote y de la unidad de vivienda, el 39,9% obtiene el agua dentro del lote, pero fuera de la unidad de vivienda y el 8,2% dentro de la unidad de vivienda
- Puerto Wilches y Sabana: Las fuentes de abastecimiento son diversas, tanto superficiales como subterráneas. La problemática más sentida por la comunidad es la falta de sistemas de potabilización. Cuentan con estructuras de captación, bombeo, tanques de almacenamiento y líneas de conducción (Corporación Autónoma Regional de Santander, n.d.-b).

En este sentido se evidencia que en la cuenca del río Sogamoso hay una presencia marcada de acueductos veredales o captaciones directas de quebradas, siendo muy pocos los municipios en donde la prestación de dicho servicio esté dada por una empresa prestadora del servicio.

SECTOR AGROPECUARIO

La vocación de las áreas rurales de los municipios que se localizan al interior de la cuenca es esencialmente agropecuaria. El 50% del área en la cuenca del río Sogamoso se encuentra dedicada a actividades económicas del renglón primario. Así mismo, se evidencia una tendencia al crecimiento agroindustrial de la palma africana, cacao, café y el caucho (Corporación Autónoma Regional de Santander, n.d.-a)

Los principales cultivos de la cuenca son: maíz, aguacate, cítricos, papaya, piña, ahuyama, frijol, arveja, plátano, yuca y mango, entre otros. De acuerdo con las estimaciones realizadas en el POMCA del río Sogamoso se tiene que aproximadamente 9.377 personas en el 2015, se vinculan a la producción agropecuaria, siendo los municipios con mayor representatividad de población rural dedicada al agro Girón y Piedecuesta, seguidos por San Vicente de Chucurí y Zapatoca.

La demanda hídrica del sector agrícola, representa el 15,9% del total de la cuenca, mientras que las actividades pecuarias representan el 6,0%. La operación de los embalses de la hidroeléctrica Sogamoso representa la demanda más alta en la cuenca (Corporación Autónoma Regional de Santander, n.d.-a).

SECTOR MINERO

HIDROCARBUROS

De acuerdo con el POMCA de la cuenca del río Sogamoso, el 56,1% del área de la cuenca se encuentra con concesiones para proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos. La producción de petróleo en la cuenca alcanza los 7 millones de barriles anuales y el 77% de la producción de petróleo se origina en el municipio de Barrancabermeja (Corporación Autónoma Regional de Santander, n.d.-a). El efecto de los bajos precios del petróleo ha conllevado a una disminución de la actividad petrolera, concentrando la extracción en menos pozos.

MINERIA

En la cuenca del río Sogamoso se encuentran 19 títulos de extracción minera otorgados. Del total del área concesionada el 50% corresponde a minería de carbón, seguido de materiales de construcción, con un 30%, y otros materiales como yeso y arcilla con el 20%. Además de las áreas otorgadas, se detectan una serie de pequeñas explotaciones artesanales de piedras, gravas y arenas de ríos en casi todos los municipios y la mayoría de las explotaciones de minerales en el área de la cuenca son de tipo artesanal y de pequeña producción (Corporación Autónoma Regional de Santander, n.d.-a)

METODOLOGÍA DE VALORACIÓN

Teniendo en cuenta que uno de los principales sectores beneficiarios del recurso hídrico en la cuenca del río Sogamoso es el sector hidroeléctrico con la central hidroeléctrica Hidrosogamoso, el ejercicio de valoración se encuentra enfocado en este actor como el principal beneficiario de los servicios ecosistémicos que presta el PNN Serranía de los Yariguíes en la cuenca, dado su localización tan próxima. Dentro de los múltiples servicios ecosistémicos que pueden ser proveídos por el área protegida, se propone analizar el servicio ecosistémico de retención de sedimentos, dado la importancia que representa para la central hidroeléctrica Hidrosogamoso. Para ello se realiza un modelamiento del comportamiento de este servicio ecosistémico bajo diferentes escenarios climáticos, utilizando el software Invest que permite mapear los sedimentos enviados a la corriente hídrica a una escala de tiempo anual, así como la cantidad de sedimentos erosionados en la cuenca y retenidos por la vegetación. Posteriormente, y luego de estimar los sedimentos retenidos por las coberturas del área protegida se identifican los costos asociados al dragado de sedimentos con el fin de reflejar los costos que se evita la central Hidroeléctrica de Sogamoso por la remoción de los sedimentos que son retenidos por las coberturas del área protegida.

SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS:

De acuerdo con Mariño (2016), la erosión y la retención de sedimentos constituyen procesos naturales que rigen la concentración de sedimentos en las fuentes de agua. La dinámica de sedimentos a escala de cuenca está en función del clima (intensidad de la lluvia), las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y por factores antropogénicos como actividades agrícolas o la construcción de represas. El uso de la tierra y los cambios en las prácticas de manejo del suelo son determinantes en la cantidad de sedimentos que son transportados a través de la cuenca (Mariño García, 2016).

Dentro de las principales fuentes de sedimentos se encuentran: la erosión terrestre (partículas de suelo desprendidas y transportadas por la lluvia y el flujo terrestre), las quebradas (canales que concentran el flujo), la erosión de bancos y la erosión masiva (o derrumbes de tierra). Las características de las concentraciones de sedimentos en los ríos dependen, casi exclusivamente, de las actividades humanas (manejo de la tierra) a nivel de cuencas hidrográficas (García-Chevesich, 2008)

En ese sentido, las coberturas naturales juegan un papel muy importante en el control y retención de sedimentos, de tal manera que, ante la ausencia de cobertura natural se vería afectada su dinámica, generando un aumento en los sedimentos que deben ser transportados por las corrientes hídricas. En ese sentido y ante un aumento en la carga de sedimentos por la baja o nula retención de los mismos, la velocidad del caudal disminuye, generando un proceso de sedimentación, resultado de la perturbación del transporte de sedimentos, que posteriormente afectará a embalses y represas.

Dentro de las implicaciones de la sedimentación para los embalses se encuentran las siguientes:

Gráfico 1. Implicaciones de la sedimentación para embalses



Fuente: este estudio

Las implicaciones que se muestran en el gráfico anterior, representan en su mayoría las consecuencias sociales, ambientales y económicas para las empresas, especialmente las hidroeléctricas, que a su vez reflejan la importancia de valorar el beneficio económico que prestan las coberturas naturales presentes en el PNN Yariguíes frente a la retención de sedimentos.

IMPLICACIONES PARA LA HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO

Los resultados de diferentes monitoreos que realiza ISAGEN al cauce del río Sogamoso, de acuerdo con el expediente LAM 0237 que reposa en la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales- ANLA, indican que geomorfológicamente el cauce del río presenta algunos cambios en el alineamiento de las márgenes, así como cambios en la sección transversal, ocasionados por los efectos de erosión y sedimentación en toda su longitud, presentándose puntos con reducciones del ancho superficial de 230 metros en el mes de febrero a 170m en el mes de noviembre, ocasionado por la acumulación de sedimentos en una de las márgenes del río. Así mismo, durante el año 2017 se presentaron fluctuaciones en el área mojada además de algunos efectos de socavación.

Con respecto a las campañas sedimentológicas, la empresa en cada una de las estaciones donde hizo las batimetrías hace una breve caracterización de la conformación de materiales allí existentes

para lo cual realizaron ensayos granulométricos, además de realizar el cálculo de la capacidad de transporte de los sedimentos en cada una de las secciones monitoreadas. De acuerdo con los resultados, los tramos con menor capacidad de transporte se presentaron a 5 km de la descarga en el mes de abril con una magnitud de 161 ton/día y en puente Sogamoso en el mes de noviembre con una capacidad de 22 ton/día. Mientras tanto en la estación a 35 km de la descarga, se presentó la mayor capacidad de transporte de sedimentos con una magnitud de 28.600 Ton/día en el mes de abril y 43.000 ton/día en el mes de noviembre.

MODELACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO

La modelación del servicio ecosistémico de retención de sedimentos se realizó mediante el software INVEST, el cual permite mapear servicios ecosistémicos y generar salidas cuantitativas y espaciales de los mismos. El modelo trabaja a una resolución espacial ráster del modelo digital de elevación (DEM) de entrada, calcula la cantidad de suelo anual perdido a nivel de píxel y la tasa de entrega de sedimentos que es la proporción de la pérdida de suelo que realmente llega a la corriente, el modelo estima la pérdida de suelo a partir de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE), la cual viene dada por:

$$uslei = Ri \cdot Ki \cdot LSi \cdot Ci \cdot Pi$$

donde,

Ri es la erosividad de la lluvia (unidades: $MJ \cdot mm(ha \cdot hr)^{-1}$),

Ki Es la erosionabilidad del suelo (unidades: $ton \cdot ha \cdot hr(MJ \cdot ha \cdot mm)^{-1}$),

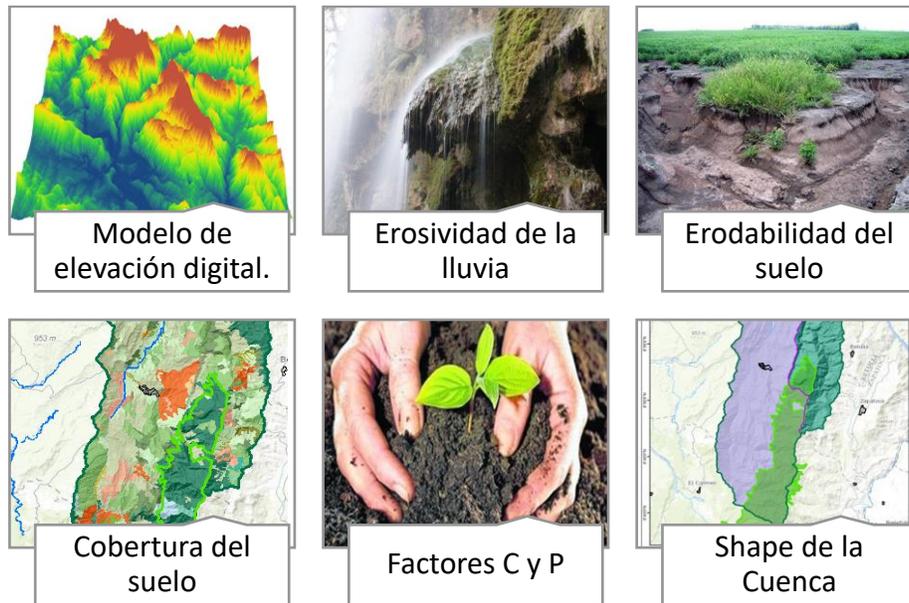
LSi es un factor de longitud de pendiente (sin unidades)

Ci Es el factor de cobertura y manejo de la vegetación.

Pi es un factor de práctica de apoyo.

Cada uno de los componentes de la anterior ecuación corresponden a los insumos necesarios para realizar la modelación a través del software INVEST. Por tanto, la información de entrada o insumos son los siguientes:

Gráfico 2. Insumos para modelo de retención de sedimentos.



Fuente: este estudio

Tabla 1. Descripción de insumos.

INSUMO	FUENTE	DESCRIPCIÓN
Modelo de elevación Digital	Estudio Nacional del Agua - ENA 2018	Representación del relieve en formato Raster. 12 metros. Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar.
Erosividad de la lluvia (R)	Cálculo y estimación a partir de los registros de 16 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM que se encuentran en la cuenca del río Sogamoso	Representa la energía con que las gotas de lluvia caen a una determinada intensidad para partir partículas del suelo que luego serán transportados. Es un conjunto de datos ráster SIG, con un valor de índice de erosividad para cada celda. Esta variable depende de la intensidad y duración de las lluvias en el área de interés.
Erodabilidad del suelo (Factor K)	Cálculo y estimación a partir de la textura del suelo en la cuenca del río Sogamoso	Es un índice que muestra la vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión y que dependen de

INSUMO	FUENTE	DESCRIPCIÓN
		las propiedades intrínsecas del suelo.
Cobertura del suelo	Capa de cobertura del suelo. Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC)	Shape de coberturas de la cuenca que dan cuenta de las diferentes actividades y usos que se presentan en el área de estudio
Factor C	Referencias Bibliográficas en (IDEAM, 2019)	Mide la influencia de diferentes tipos de cultivo para erosionar el suelo.
Prácticas de manejo: Factor P	Factor que considera las prácticas de manejo, cuando se presentan en los diferentes cultivos. Se obtuvo a partir del promedio de factores P para cada cobertura de la capa nacional de Factor P del Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019)	Refleja las prácticas de manejo en el suelo, especialmente en cultivos.

Fuente: Este estudio con base en (Bedoya, 2016)

RESULTADOS

De acuerdo con el modelo de retención de sedimentos que se expuso anteriormente, para la valoración biofísica se hace necesario el análisis de variables climática, principalmente la precipitación. Para ello se realiza un análisis exploratorio de las series de tiempo de precipitación para detectar por medios gráficos y cuantitativos la existencia de una tendencia y/o cambio, así como la homogeneidad de las series, de esta manera se realiza una verificación en la calidad de la información que reposa en cada una de las estaciones objeto de estudio. Posteriormente, se realiza un análisis confirmatorio a través de pruebas estadísticas que permitan identificar las estaciones que cuentan con información confiable para la construcción del índice de erosividad de la lluvia. Así mismo, se construyeron los restantes insumos necesarios para integrar al modelo de retención de sedimentos.

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE SERIES DE TIEMPO

ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD

Los datos hidrometeorológicos utilizados en el modelo para la construcción del índice de erosividad de la lluvia se sustrajeron de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, para las 16 estaciones hidrometeorológicas que se encontraron dentro de la cuenca del río Sogamoso. Las estaciones son:

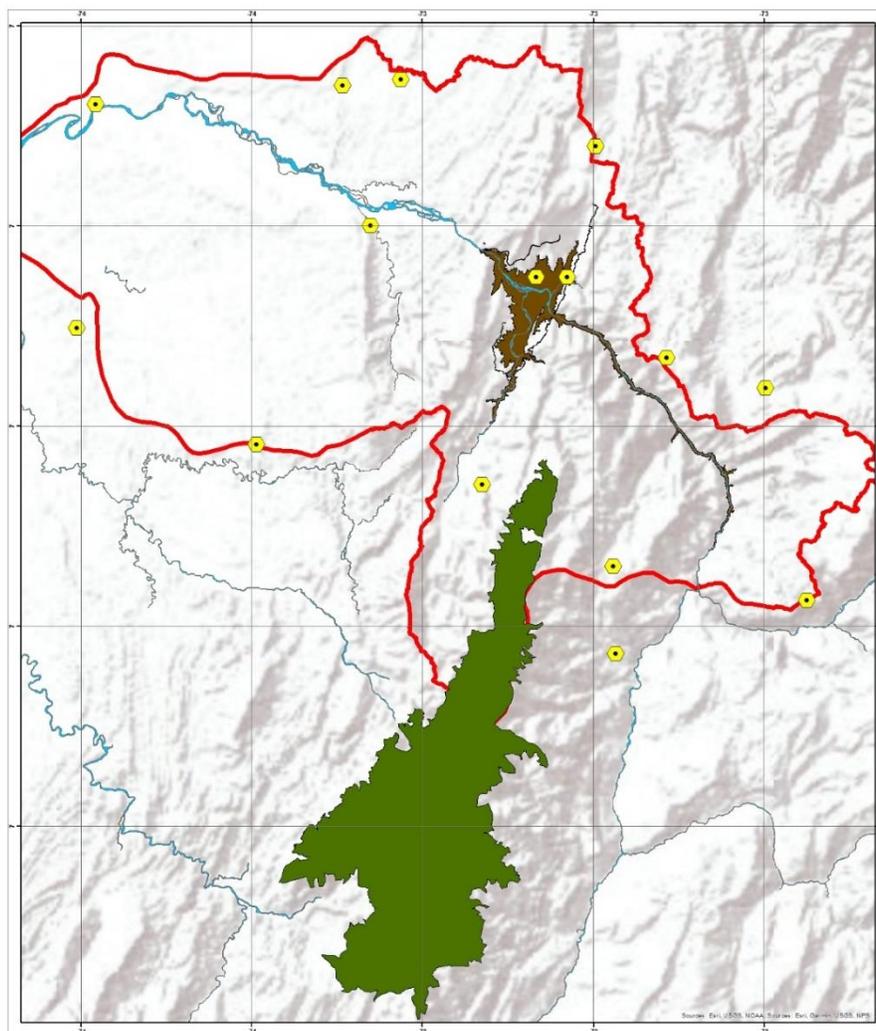
Tabla 2. Estaciones hidrometeorológicas en Cuenca del río Sogamoso

Est. Aguasclaras	Est. Coquera	Est. Parroquia	Est. La Fuente
Est. Albania	Est. La mesa	Est. Zapatoca	Est. Payoa
Est. Apto Yariguies	Est. San Vicente	Est. Pantano	Est. Palo Gordo
Est. Brisas	Est. Putana	Est. Trigueros	Est. Naranjo

Fuente: este estudio con base en registros IDEAM.

De acuerdo con los registros del IDEAM se tiene que, en las estaciones de la cuenca del río Sogamoso hay un conjunto de datos faltantes distribuidos en el periodo de 30 años analizado (1990- 2019), por lo que se considera necesario aplicar un análisis de homogeneidad de series de tiempo para identificar las estaciones que tienen mejor calidad en sus datos y en las cuales se puede realizar un ejercicio estadístico para completar datos faltantes.

Mapa 5. Estaciones hidrometeorológicas IDEAM ubicadas en la cuenca del río Sogamoso



0 3,25 6,5 13 19,5 26 Kilometers

1:250.000

Leyenda

- PNN Yariquies
- Rios
- Hidroeléctrica Sogamoso
- cuenca_SOGAMOSO
- estaciones hidrometeorológicas

Estaciones hidrometeorológicas en cuenca del río Sogamoso



Fuente: este estudio

La información de las estaciones, que se localizan en el departamento de Santander, es la siguiente:

Tabla 3. Información climática en estaciones objeto de estudio

CODIGO	NOMBRE	CATEG_1	ESTADO ²	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)	Precipitación diaria - PTPM_CON (mm/día)	Temperatura TSSM (°C)	Caudal medio diario - Q_MEDIA_D (m3/s)	Nivel medio diario - NV_MEDIA_D (cm)
24060040	Aguasclaras	PM	ACT	7,264167	-73,548056	132	x			
24050110	Albania	PM	ACT	6,911944	-73,632222	216	x			
23155030	Apto yariguíes	SP	ACT	7,026389	-73,808611	126	x	x		
24065010	Brisas las hda	CO	ACT	7,246111	-73,79	138	x	x		
23180120	Coquera	PM	ACT	7,222778	-73,919167	170	x			
24050100	Fuente	PM	ACT	6,70725	-73,279889	815	x			
24060050	Mesa	PM	ACT	6,759167	-73,092778	1,46	x			
23190440	Naranja	PM	ACT	7,205	-73,299722	825	x			
23190280	Palo gordo	PM	ACT	6,9675	-73,133056	950	x			
23190600	Pantano	PM	ACT	6,9975	-73,230278	1,28	x			
24060070	Parroquia	PG	SUS	7,076389	-73,327778	267	x			
24060080	Payoa	PM	ACT	7,270278	-73,490833	161	x			
24060060	Pte la paz	PM	ACT	7,108611	-73,419444	180	x		x	x
24050070	Putana	PM	ACT	7,127167	-73,520556	150	x			
24050060	San Vicente	PM	ACT	6,872778	-73,410833	721	x			
24065030	Trigueros hda	CP	SUS	7,076667	-73,358056	400	x	x		
24055030	Zapatoca	CO	ACT	6,792778	-73,28275	1,81	x	x		

Fuente: este estudio con base en registros IDEAM

De acuerdo con la anterior tabla todas las estaciones contienen información de precipitación, las series de tiempo asociadas a dichas estaciones en la base de datos del IDEAM son series diarias por lo que se procede a realizar un análisis de calidad de la información con el fin de convertir a datos mensuales. Este análisis de homogeneidad permitió identificar datos faltantes y a través del Software estadístico R se realizó el completado de los datos y con ello seleccionar las estaciones en donde hubiese registros homogéneos, con o sin datos faltantes, que aprobaran las pruebas estadísticas realizadas a través del test de normalidad (prueba de normalidad Kolmogorow), test de medias iguales y test de varianzas iguales en los dos subconjuntos que se estructuraron para cada una de las estaciones.

¹ CATEGORIA: PM: Pluviómetrica PG: Pluviográfica CO: climatológica SP: Sinóptica principal

² ACT: Activo SUS: Suspendido

ANÁLISIS DESCRIPTIVO

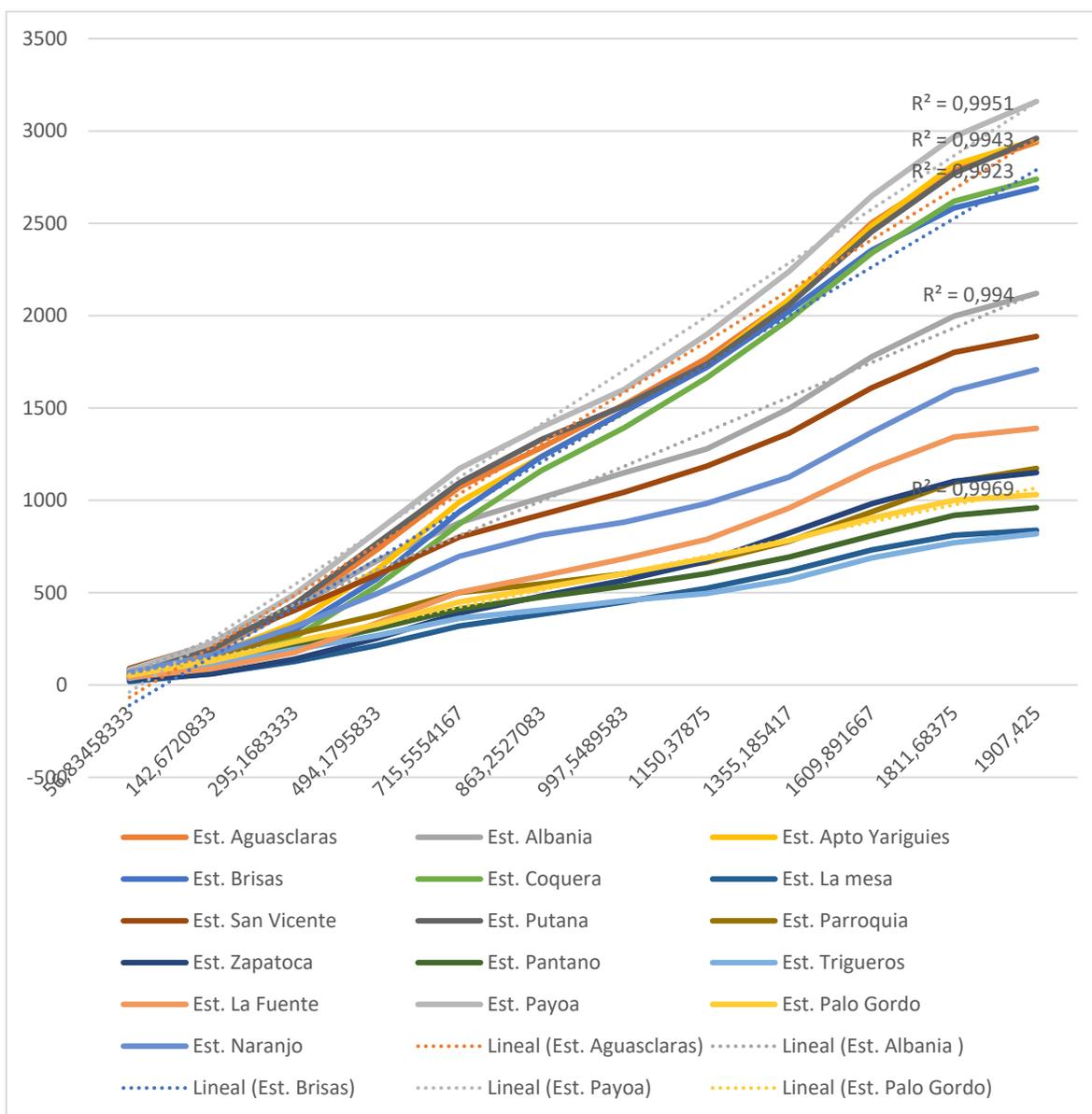
En una primera fase de manera descriptiva, se analizó la información de las estaciones teniendo en cuenta los datos faltantes, se promedió la información de todas las estaciones y se realizó un análisis de doble masa en donde se compara los registros de cada una de las estaciones con una estación patrón que recopila el promedio de todas las estaciones, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4. Información precipitación estaciones/mes, en mm

Estaciones	Est. Patrón	Aguasclaras	Albania	Yaniguies	Brisas	Coquera	Lameza	San Vicente	Putana	Parroquia	Zapato	Pantano	Trigueros	La Fuente	Payoa	Palo Gordo	Narajo
ENERO	56,8	71,9	86,2	60,2	54,7	34,7	18,7	89,8	75,8	61,0	29,4	46,7	35,8	41,9	82,4	52,1	68,0
FEBRERO	142,7	181,4	195,2	158,6	122,3	97,0	61,0	222,5	193,0	161,4	60,2	110,6	112,5	88,5	225,8	130,4	162,3
MARZO	295,2	415,1	417,0	336,0	296,9	256,3	127,0	404,0	437,8	275,3	139,9	209,0	191,9	176,4	490,4	234,8	315,0
ABRIL	494,2	732,0	672,6	623,7	574,5	533,9	214,2	597,3	766,5	378,5	252,5	305,9	267,7	335,7	830,6	327,2	494,1
MAYO	715,6	1071,7	879,3	989,9	938,1	871,7	319,1	801,2	1095,1	500,1	388,9	412,0	361,2	501,8	1172,3	449,5	697,0
JUNIO	863,3	1286,4	1015,2	1237,7	1237,3	1162,4	383,8	922,7	1330,6	547,5	481,5	475,9	406,1	590,8	1396,5	525,9	811,7
JULIO	997,5	1518,9	1149,5	1478,6	1481,3	1393,6	450,7	1044,1	1512,3	602,2	567,3	535,8	456,9	684,3	1600,6	602,8	881,8
AGOSTO	1150,4	1770,1	1278,0	1738,5	1719,7	1663,6	524,0	1184,7	1737,3	665,2	670,2	603,2	495,4	788,6	1897,5	686,9	983,2
SEPTIEMBRE	1355,2	2083,6	1497,4	2089,0	2024,6	1979,2	616,9	1363,6	2058,5	777,9	822,9	692,7	570,5	958,1	2239,1	782,8	1126,2
OCTUBRE	1609,9	2501,8	1777,0	2486,0	2354,2	2338,5	731,1	1609,1	2454,0	937,4	981,4	808,8	688,1	1171,3	2647,5	903,9	1368,3
NOVIEMBRE	1811,7	2791,2	1997,4	2817,1	2582,6	2619,0	810,8	1800,9	2770,4	1098,9	1103,1	918,8	770,4	1342,5	2969,2	1000,2	1594,6
DICIEMBRE	1907,4	2939,0	2120,6	2953,5	2691,6	2739,0	837,9	1887,1	2960,5	1173,2	1150,4	959,7	818,8	1389,6	3159,7	1030,7	1707,6

Fuente: este estudio

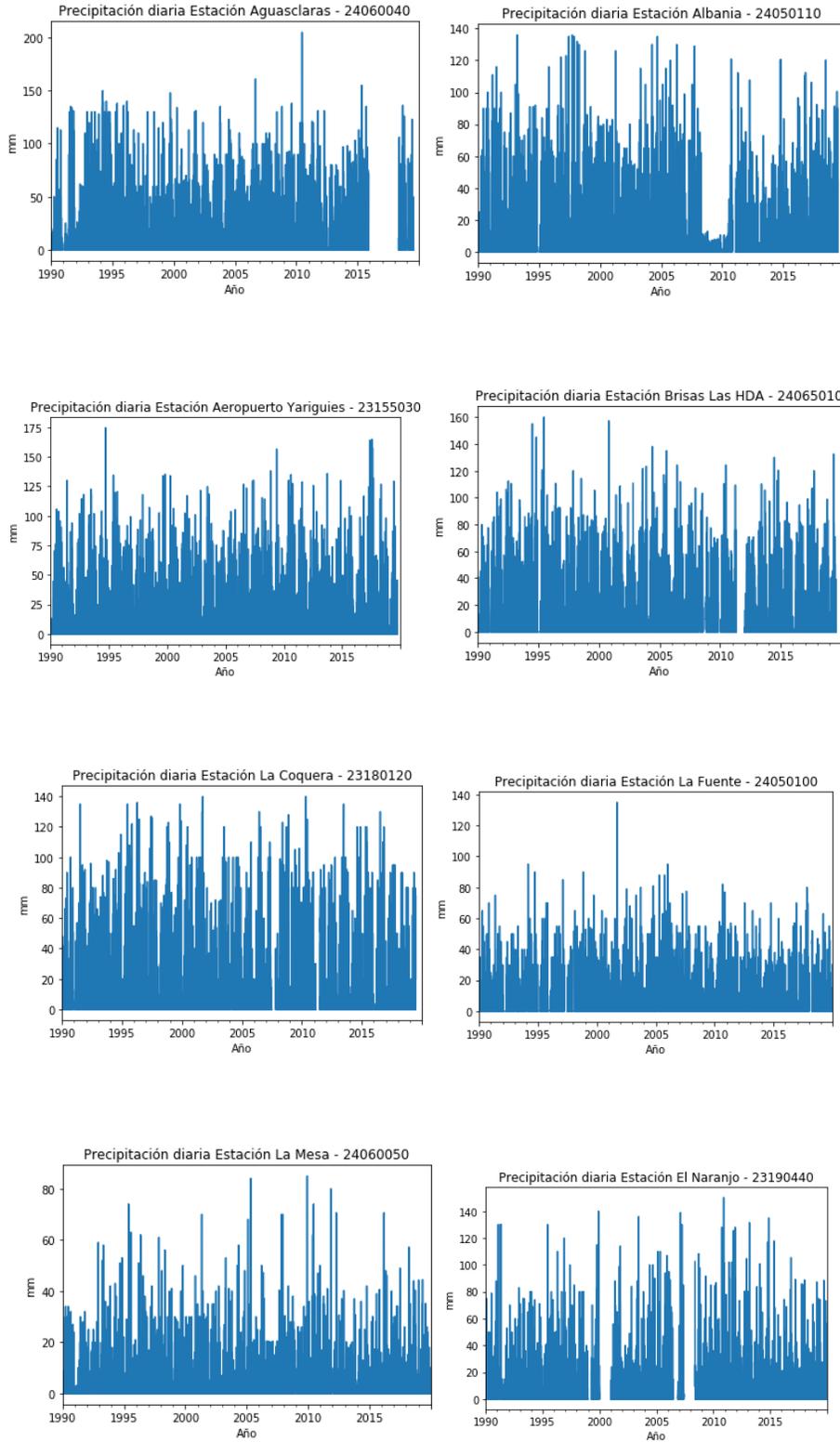
Gráfico 3. Gráfico de doble masa

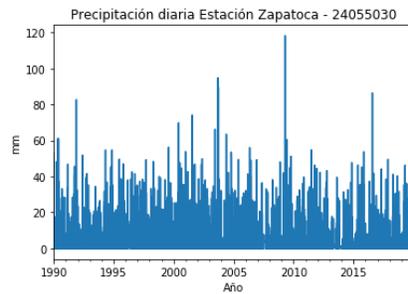
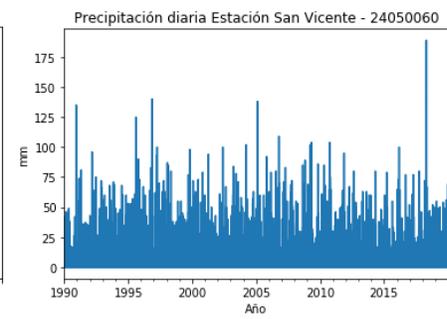
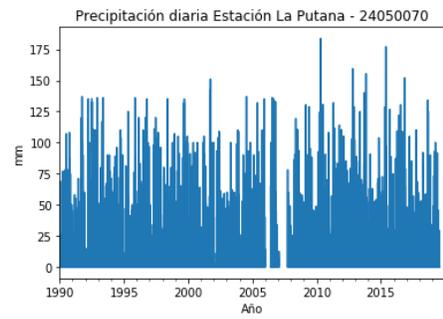
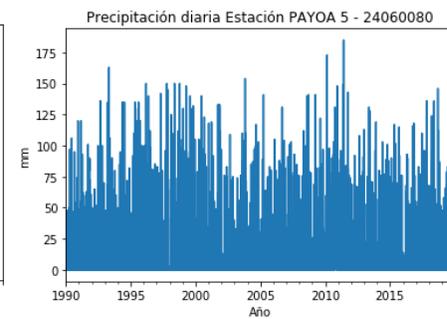
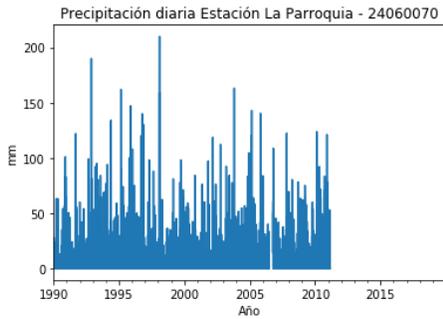
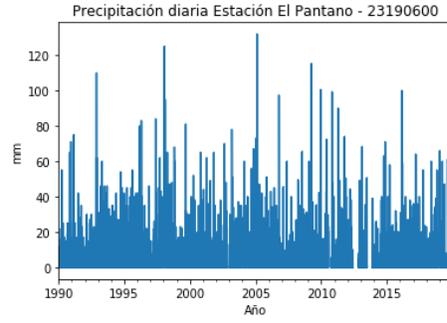
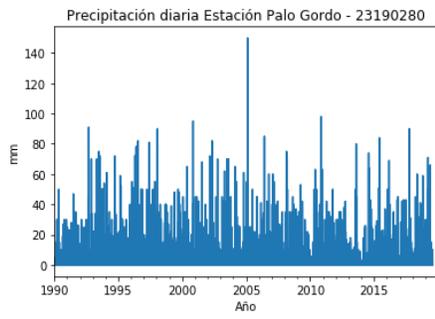


Fuente: este estudio

Como se ha mencionado anteriormente, los datos faltantes en las series diarias es un criterio que puede afectar la calidad de la información de cada estación, en este sentido, una estación con demasiados datos faltantes en las series diarias, podría tener problemas en la calidad de las series mensuales que se construyan. A continuación, se muestran las gráficas de los datos para cada una de las estaciones, es importante tener en cuenta que, los datos faltantes se evidencian como vacíos en cada una de las gráficas, lo que a su vez podría representar inconsistencia en la medición:

Gráfico 4. Series de tiempo diarias en las estaciones

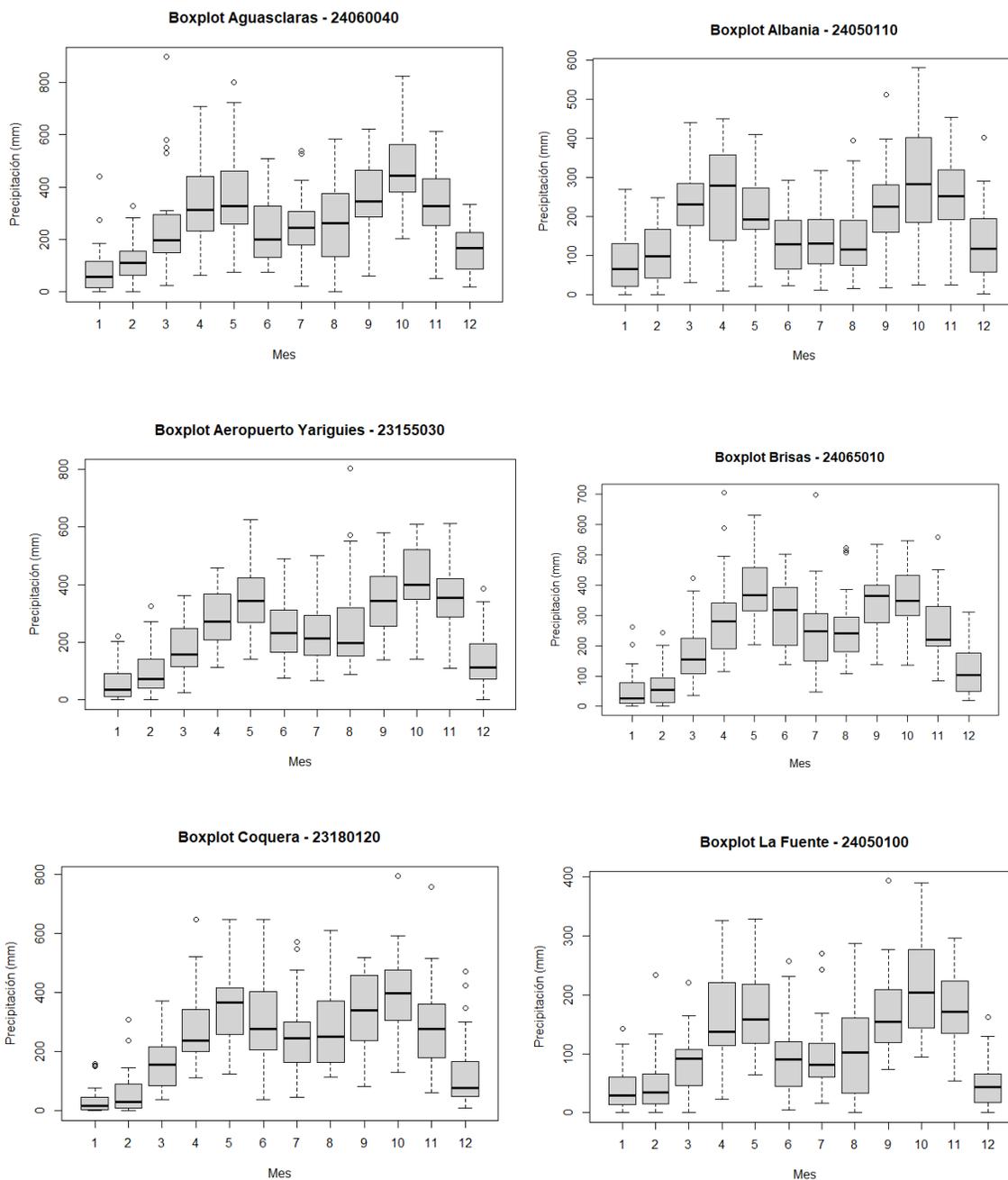




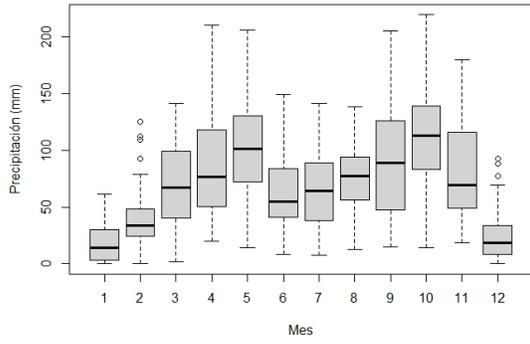
Fuente: este estudio con base en salidas R

Las gráficas de cajas permiten resumir la información y brindan una idea de la tendencia central, variabilidad, simetría y presencia de puntos atípicos (Castro & Carvajal, 2010), tal y como se muestra a continuación:

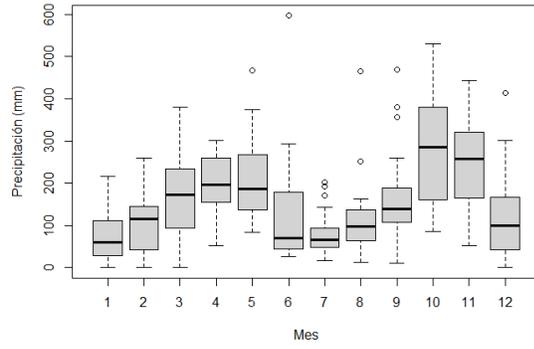
Gráfico 5. Gráficos de caja y bigotes



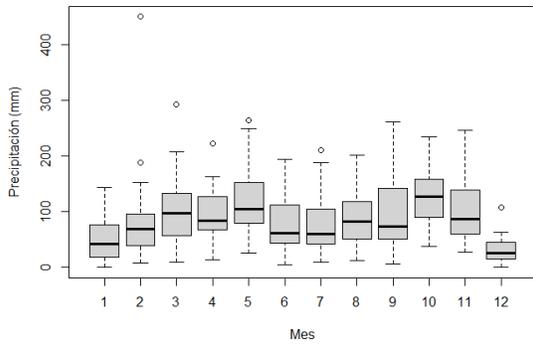
Boxplot La Mesa - 24060050



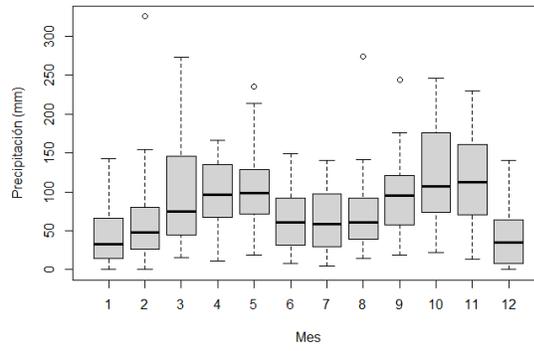
Boxplot Naranjo - 23190440



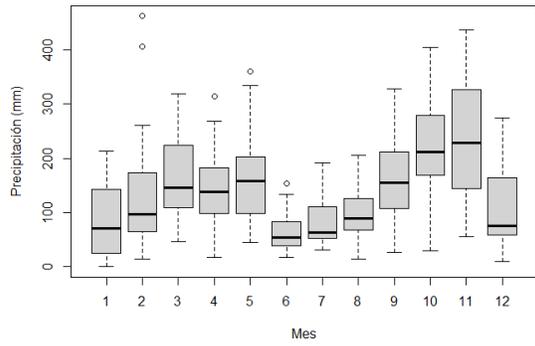
Boxplot Palo Gordo - 23190280



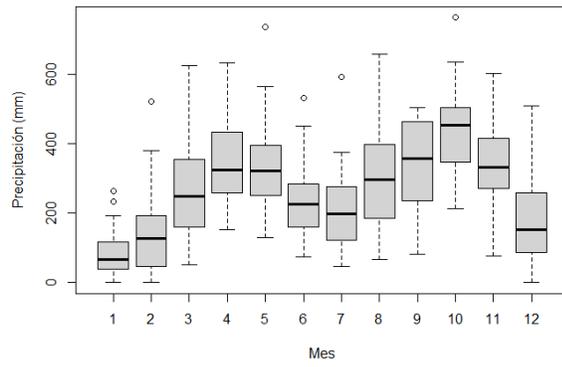
Boxplot El Pantano - 23190600

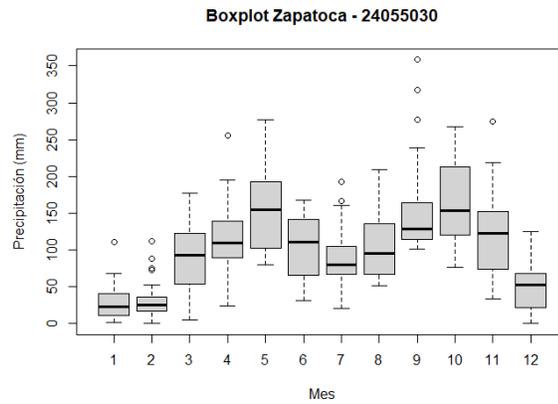
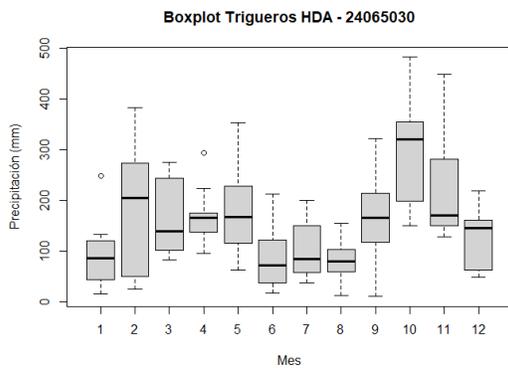
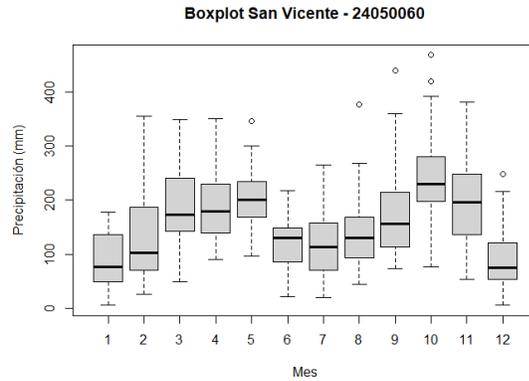
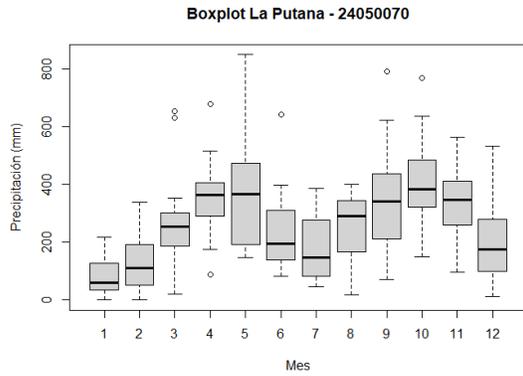


Boxplot La Parroquia - 24060070



Boxplot Payoa - 24060080





Fuente: este estudio

ANÁLISIS CONFIRMATORIO DE SERIES DE TIEMPO

Luego de realizar el análisis descriptivo se procedió a realizar las pruebas de normalidad, medias iguales y varianzas iguales y, por último, a completar los datos faltantes con el fin de identificar cuales estaciones cumplen con criterios de calidad para integrar en el estudio. Dado que las series climáticas pueden evidenciar algunos problemas de homogeneidad y en su distribución que se pueden considerar fenómenos normales dado las variaciones climáticas, se considera que, para efectos de este estudio se seleccionarán las estaciones que cumplan al menos uno de los criterios anteriormente mencionados (normalidad, medias iguales o varianzas iguales). Los resultados fueron los siguientes:

PRUEBAS ESTADÍSTICAS

PRUEBAS DE MEDIAS IGUALES:

Criterios: Si el valor p es menor $(0.05)^3$ se debe rechazar la hipótesis nula. Si el valor p es mayor a (0.05) se debe aceptar la hipótesis nula.

PRUEBA DE HIPÓTESIS DIFERENCIAS EN VARIANZA- PRUEBA F:

Criterios: H_0 = varianzas iguales, H_1 = varianzas diferentes. Si el valor p es menor a alfa (0.05) se debe rechazar la hipótesis nula. Si el valor p es mayor a alfa (0.05) se debe aceptar la hipótesis nula.

PRUEBA NO PARAMÉTRICA: HIPÓTESIS IGUALDAD DE POBLACIONES

Prueba U de Mann-Whitney

Criterios: H_0 : las dos poblaciones son iguales. H_1 : Las dos poblaciones no son iguales. Si el valor p es menor a alfa (0.05) se debe rechazar la hipótesis nula. Si el valor p es mayor a alfa (0.05) se debe aceptar la hipótesis nula.

Tabla 5. Resultado de pruebas estadísticas

ESTACIONES	PRUEBA DE MEDIAS	PRUEBA DE VARIANZA	IGUALDAD DE POBLACIONES
AGUASCLARAS	Iguals	Iguals	Iguals
ALBANIA	Diferentes	Iguals	Diferentes
YARIGUIES	Iguals	Iguals	Iguals
BRISAS	Iguals	Iguals	Iguals
COQUERA	Iguals	Diferente	Iguals
LA MESA	Diferentes	Iguals	Diferentes
SAN VICENTE	Iguals	Iguals	Iguals
PUTANA	Iguals	Iguals	Iguals
PARROQUIA	Iguals	Iguals	Iguals
ZAPATOCA	Iguals	Iguals	Iguals
PANTANO	Iguals	Iguals	Iguals
TRIGUEROS	Iguals	Iguals	Iguals
LA FUENTE	Iguals	Iguals	Iguals
PAYOA	Iguals	Iguals	Iguals
PALO GORDO	Iguals	Iguals	Iguals
NARANJO	Iguals	Iguals	Iguals

Fuente: este estudio

³ Valor umbral fijado como error

ESTACIONES SELECCIONADAS

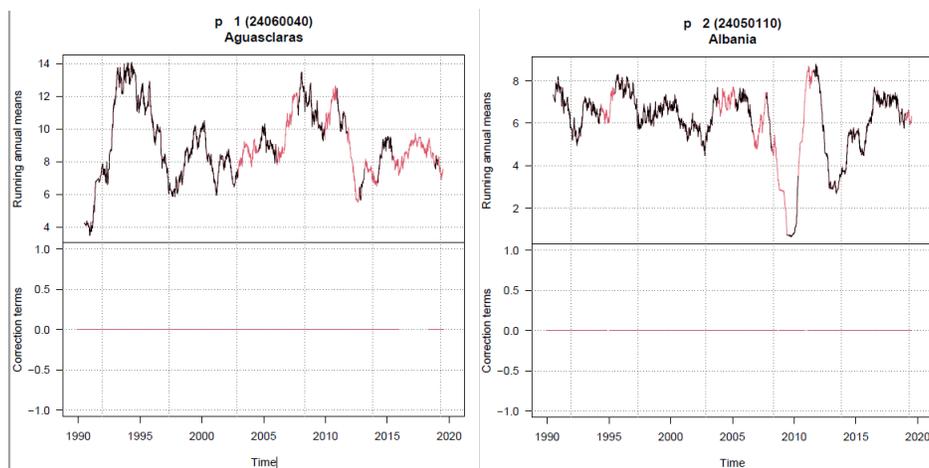
De acuerdo con los anteriores resultados se seleccionaron las estaciones que aprobara al menos una de las anteriores pruebas

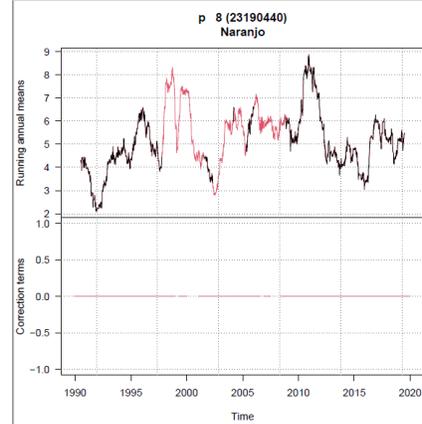
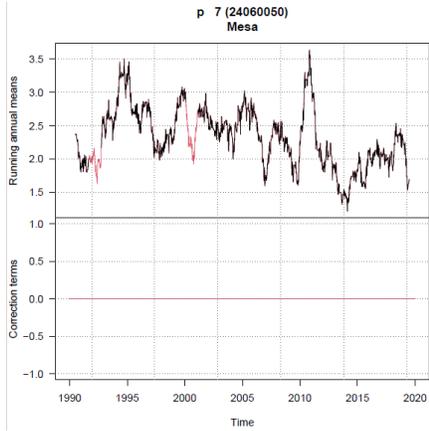
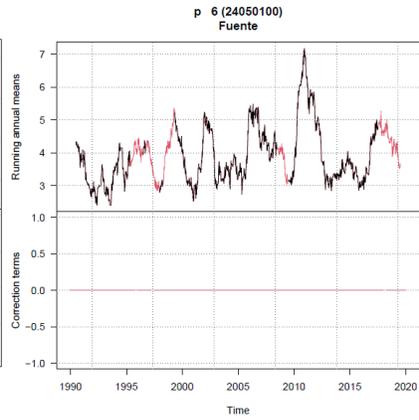
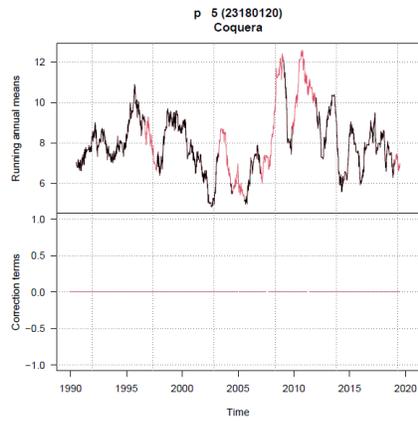
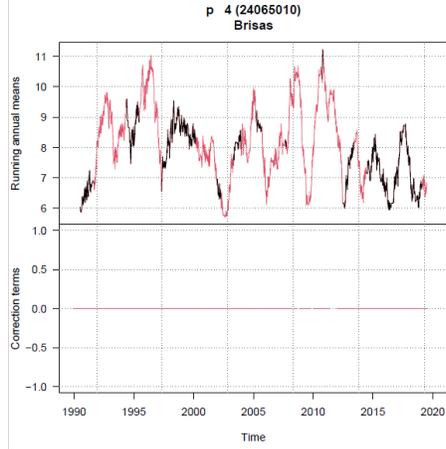
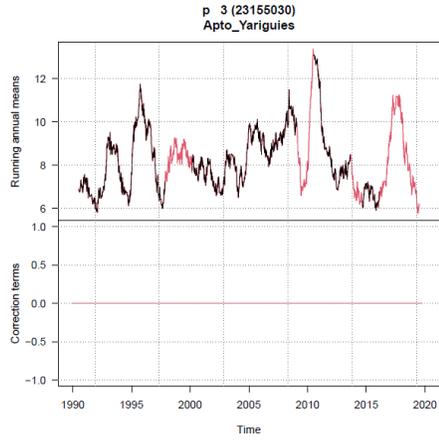
ESTACIONES	PRUEBA DE MEDIAS	PRUEBA DE VARIANZA	IGUALDAD DE POBLACIONES	ESTACIONES SELECCIONADAS
AGUASCLARAS	X	X	X	X
ALBANIA		X		X
YARIGUIES	X	X	X	X
BRISAS	X	X	X	X
COQUERA	X		X	X
LA MESA		X		X
SAN VICENTE	X	X	X	X
PUTANA	X	X	X	X
PARROQUIA	X	X	X	X
ZAPATOCA	X	X	X	X
PANTANO	X	X	X	X
TRIGUEROS	X	X	X	X
LA FUENTE	X	X	X	X
PAYOA	X	X	X	X
PALO GORDO	X	X	X	X
NARANJO	X	X	X	X

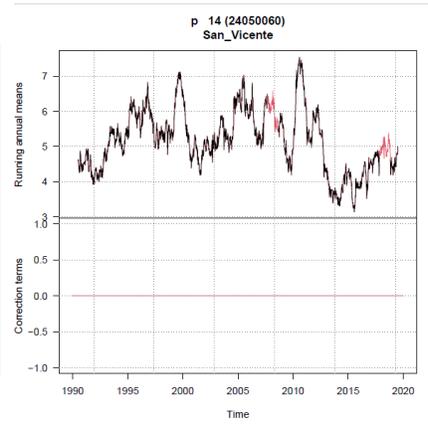
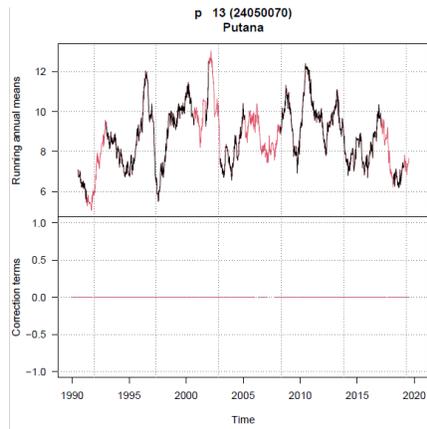
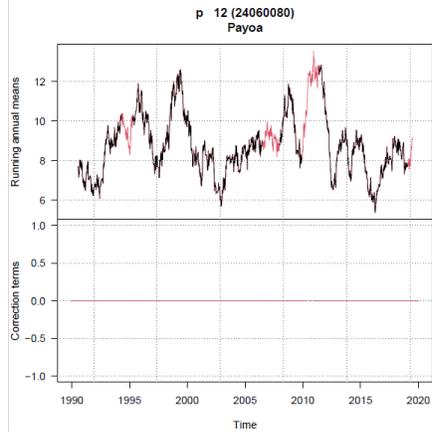
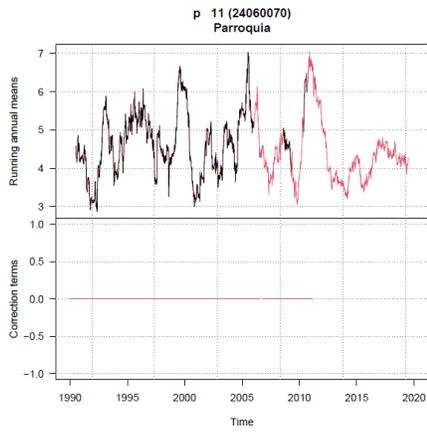
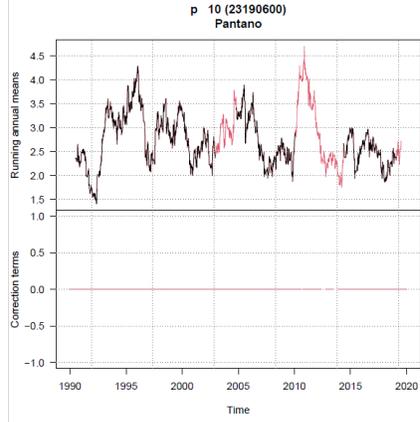
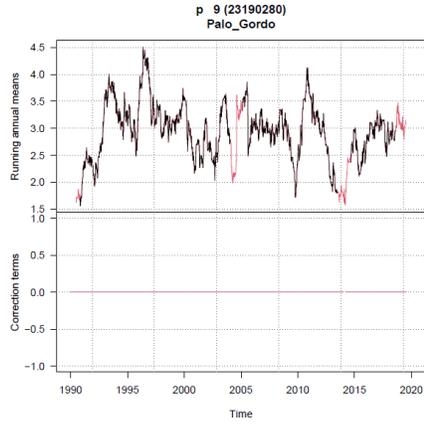
Fuente: este estudio

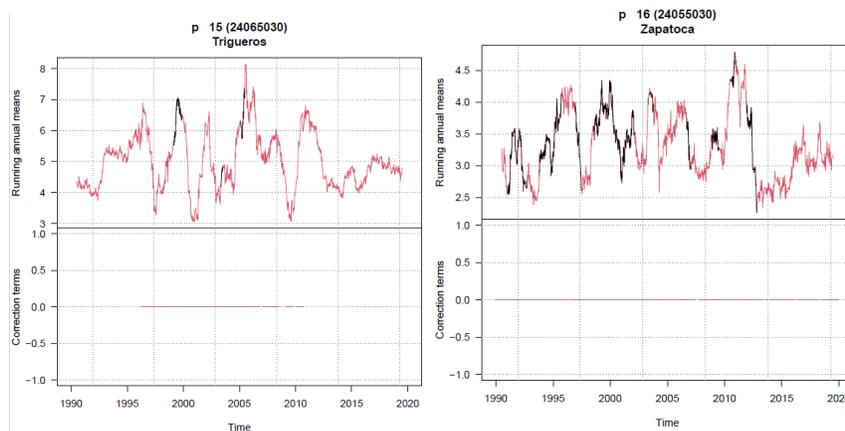
Los ajustes a las series de tiempo por medio del software R fueron los siguientes:

Gráfico 6. Ajustes a series de tiempo









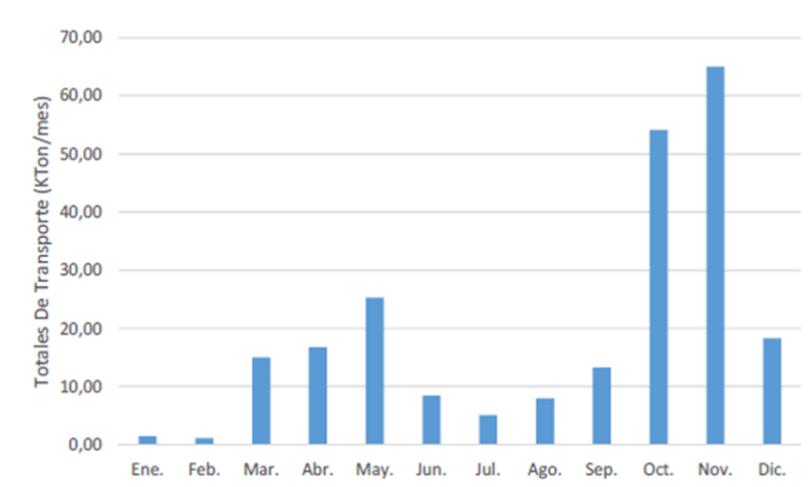
Fuente: este estudio

VALORACIÓN BIOFÍSICA- ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS RETENIDOS

DELIMITACIÓN DE CUENCA DE REFERENCIA

Para la estimación de los sedimentos exportados y retenidos por las coberturas presentes en el área protegida del PNN Yariguíes se realiza, en primera instancia, la delimitación de la cuenca hasta una estación de referencia en donde se tiene disponible información de sedimentos necesaria para calibrar el modelo. Esta estación corresponde a Puente Comuna que de acuerdo con el POMCA del río Sogamoso tiene la siguiente información:

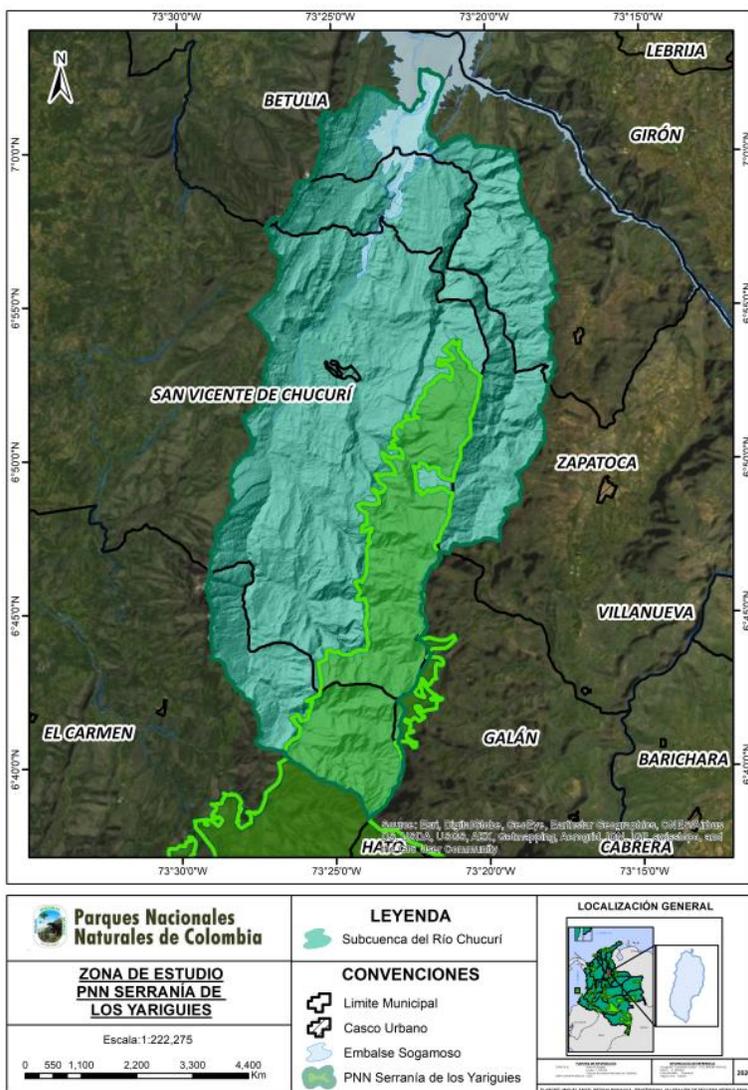
Gráfico 7. Sedimentos en estación Puente Comuna-promedio mensual 1900-2010 (1000Ton/mes)



Fuente: POMCA Rio Sogamoso

De acuerdo con el POMCA del río Sogamoso, la distribución temporal del transporte total de sedimentos en suspensión en la estación Puente Comuna, es de tipo bimodal a lo largo del año, siguiendo el mismo patrón de los caudales. Las cifras que se muestran en la gráfica corresponden al promedio mensual de sedimentos entre los años 1900 y 2010. Los valores más altos se registran en los meses de abril y mayo en el primer semestre del año, con valores de 16,72 y 25,25 KTon/mes y en octubre y noviembre en el segundo semestre, con valores de 52 y 65 KTon/mes, los valores más bajos se presentan en los meses de diciembre a marzo y de junio a septiembre, siendo el mes de menores registros febrero, con un valor de 1,10 KTon/mes. El valor promedio anual es de 218,84 KTon, El valor más alto registrado es de 856,75 KTon y se presentó en el año 2010 y el valor más bajo se presentó en el año 1990, con un valor de 1,0 KTon. La delimitación de la cuenca hasta dicha estación corresponde a la cuenca del río Chucurí, tal y como se muestra a continuación:

Mapa 6. Delimitación Cuenca Rio Chucurí.



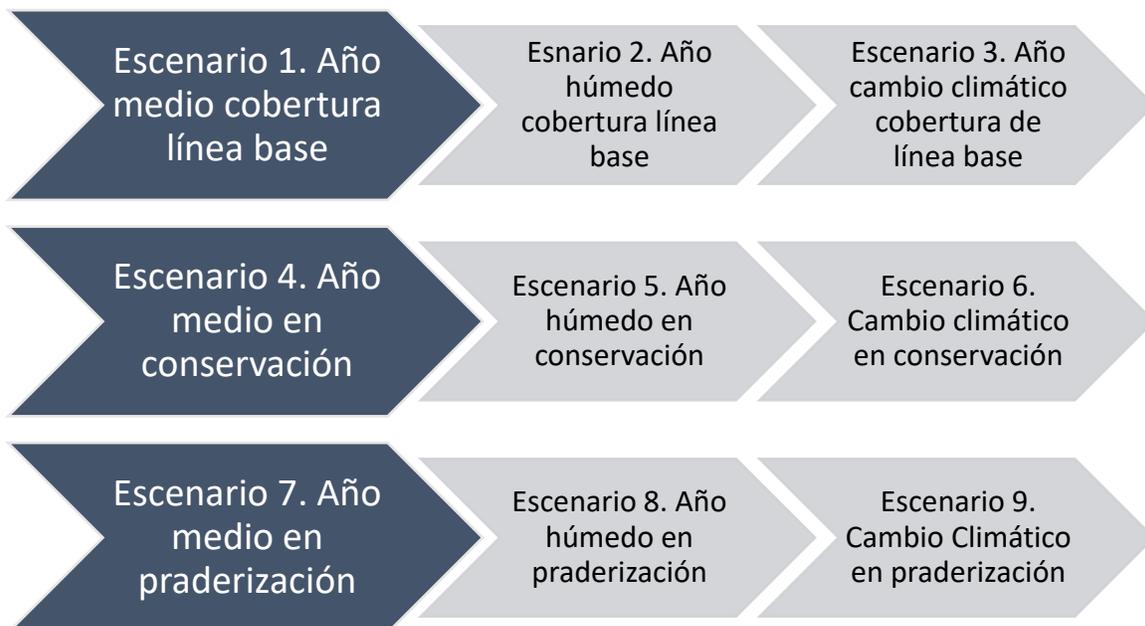
Fuente: este estudio

MODELACIÓN SEDIMENTOS- INVEST

A través del Software Invest se realiza una modelación de los sedimentos retenidos. Este tipo de modelos permite mapear la generación de sedimentos terrestres y su entrega a la corriente.

Las salidas del modelo de sedimento incluyen la carga de sedimento enviada a la corriente a una escala de tiempo anual, así como la cantidad de sedimento erosionada en la cuenca y retenida por la vegetación y las características topográficas. Para ello se plantearon los siguientes escenarios:

Gráfico 8. Escenarios de modelación



Fuente: este estudio

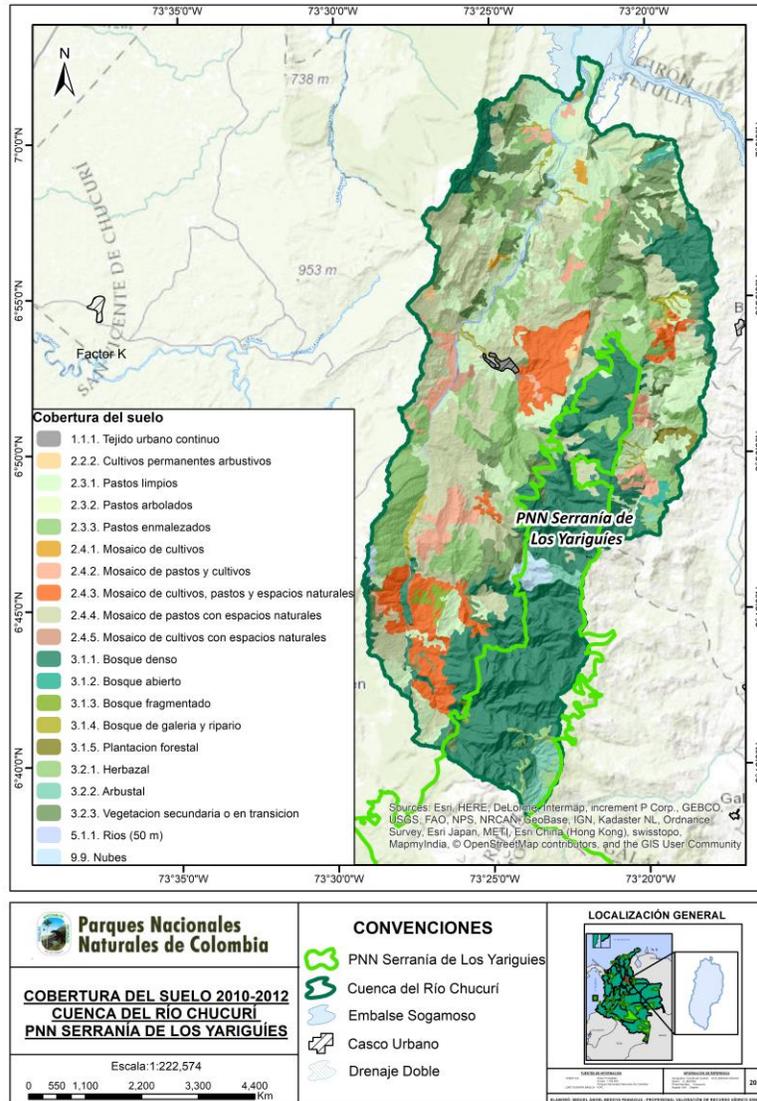
INSUMOS PARA LA MODELACIÓN

De acuerdo con lo que se ha mostrado anteriormente, la modelación del servicio de retención de sedimentos a través del Software Invest requiere los siguientes insumos espaciales:

- Shape y Raster de coberturas
- Raster del factor R- Erosividad de la lluvia, para los escenarios climáticos planteados
- Raster del factor K: erodabilidad del suelo

COBERTURAS EN LA CUENCA OBJETO DE ESTUDIO

Mapa 7. Coberturas en cuenca del río Chucurí



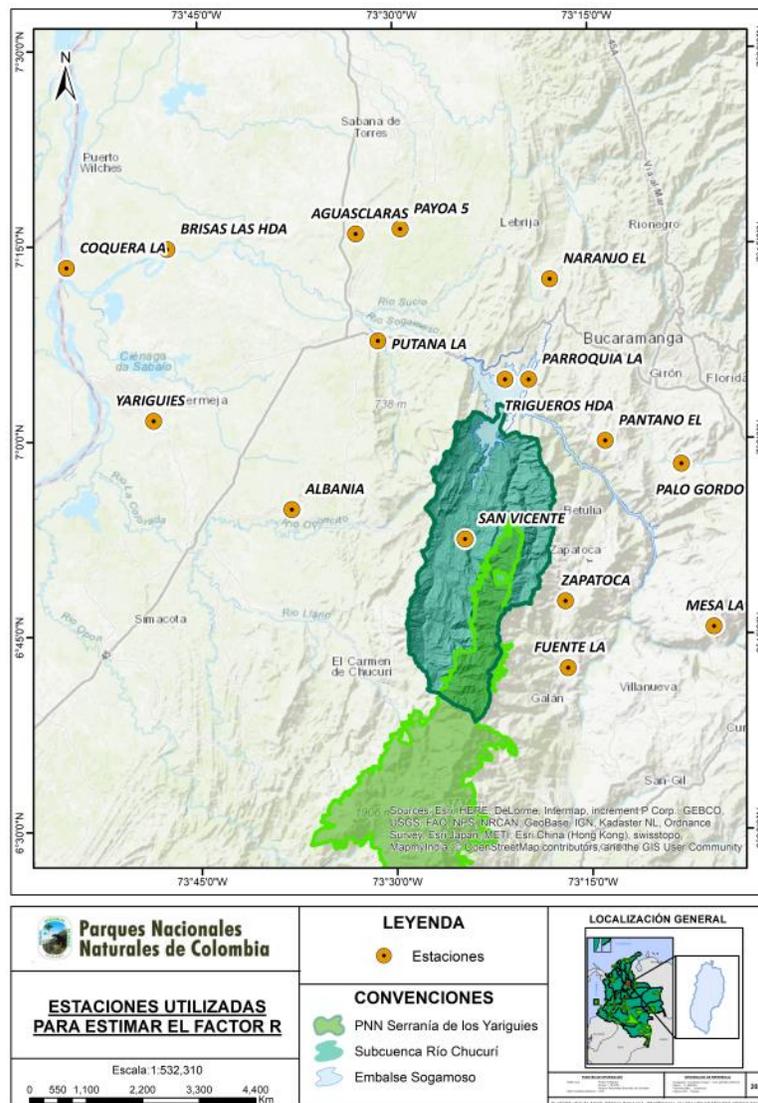
Fuente: estudio

De acuerdo con la delimitación del área de estudio que corresponde a la cuenca del río Chucurí, donde se encuentra la estación de cierre y calibración se tiene que, es una cuenca altamente intervenida con una presencia muy marcada de pastos y cultivos y se puede observar que, las coberturas naturales más conservadas se focalizan al interior del área protegida, por lo que se podría relacionar con la importancia que tienen dichas coberturas en la prestación de servicios ecosistémicos y en especial de éste, para la cuenca.

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA: FACTOR R

Esta variable representa la energía con que las gotas de lluvia que caen a una determinada intensidad pueden romper los agregados superficiales en partículas de tamaño transportable. Para calcular el índice de erosividad de la lluvia, se estructuran tres escenarios: año medio, año húmedo y un escenario de cambio climático, que representa un incremento de 17,74% en la precipitación media multianual con base en los escenarios de cambio climático para el departamento de Santander de la tercera comunicación nacional de cambio climático del IDEAM (IDEAM, 2015). De acuerdo con los datos reportados en las estaciones seleccionadas se estimó el factor de erosividad de la lluvia cuyos resultados fueron:

Mapa 8. Estaciones utilizadas para el análisis de precipitación



Fuente: este estudio

Tabla 6. Estimaciones del factor R de erosividad en escenarios climáticos

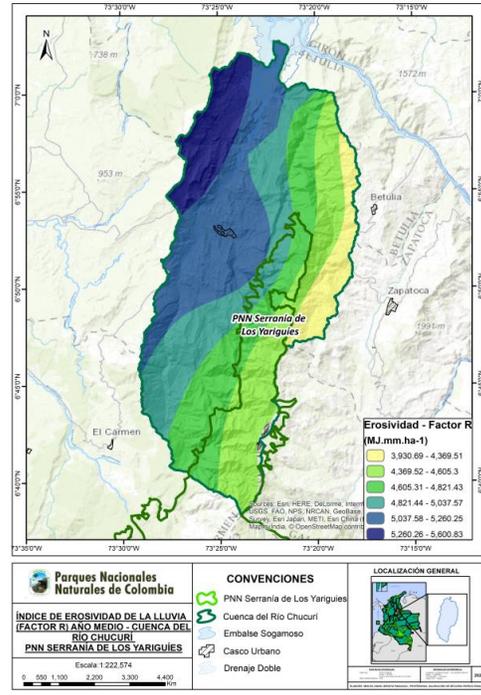
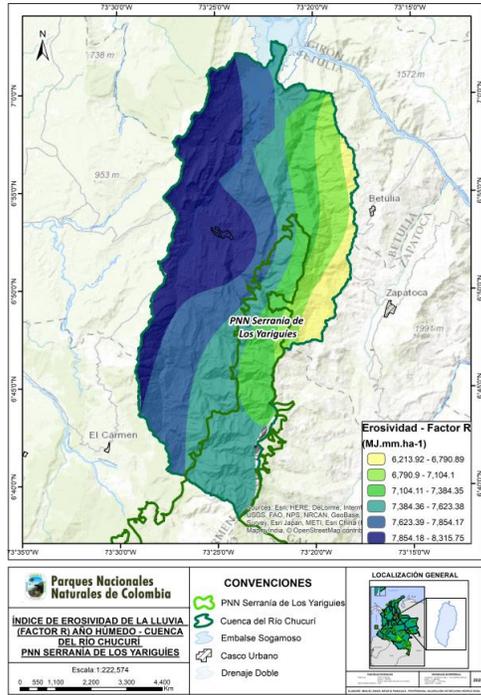
Factor R				
Código de estación	Escenario Año Medio	Escenario Año húmedo	Escenario Cambio Climático	Estaciones
24060040	9516,13785	12211,73935	11199,28029	Aguasclaras
24050110	6355,1831	10193,33361	7477,572163	Albania
23155030	8961,58615	14602,68974	10546,35112	Yariguies
24065010	8836,45798	11799,16084	10399,0252	Brisas
23180120	8982,54605	12182,56025	10571,0293	Coquera
24050100	4465,30255	8310,766274	5252,426806	Fuente
24060050	2497,08151	4035,908994	2935,043347	Mesa
23190440	5571,64362	9227,374403	6555,032775	Naranjo
23190280	2929,70117	4624,000288	3444,409739	Palo Gordo
23190600	2817,72185	4949,958142	3312,565285	Pantano
24060070	4822,58554	7733,159029	5673,091796	Parroquia
24060080	9169,036	13961,57098	10790,60257	Payoa
24050070	9064,06379	11379,11574	10667,00828	Putana
24050060	5236,67845	7995,809917	6160,644787	San Vicente
24065030	5158,93348	7136,140942	6069,107854	Trigueros
24055030	3653,02135	5684,371569	4296,046918	Zapatoca

Fuente: este estudio

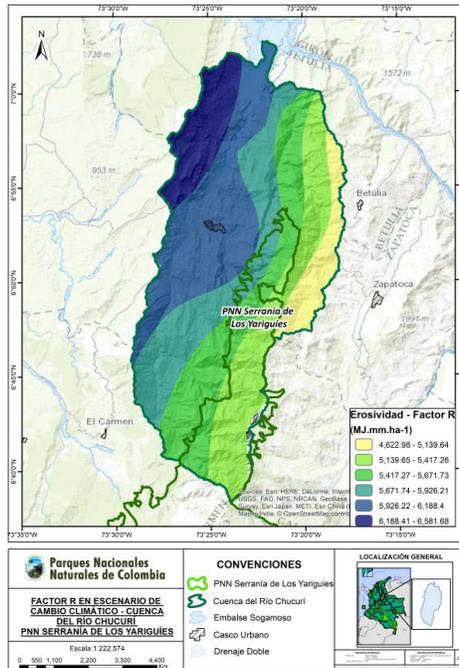
Mapa 9. Mapeo de erosividad de la lluvia en diferentes escenarios

ESCENARIO AÑO HÚMEDO

ESCENARIO AÑO MEDIO:



ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO:



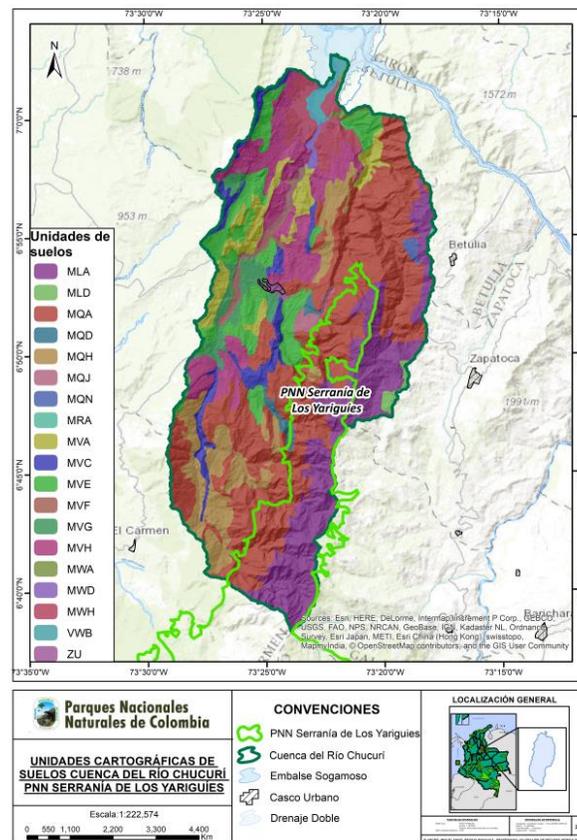
Fuente: este estudio

En los anteriores mapas se puede observar la variación del factor de erosividad de la lluvia para los diferentes escenarios planteados. Para el escenario de año medio se observa que este factor varía entre 3,9 y 5,6 MJ.mm. ha, presentándose dentro del área protegida un factor que oscila entre 4,3 y 4,8, mientras que el factor más alto se encuentra en la parte baja de la cuenca, cercano a la hidroeléctrica. Para el escenario de año húmedo los rangos de dicho factor varían entre 6,2 y 8,3 MJ.mm. ha, evidenciándose un incremento en la erosividad de la lluvia con respecto al año medio y aumentándose el área donde la lluvia tiene mayor fuerza de erosión, focalizándose ya no solo para la parte baja de la cuenca, sino que, para la zona media e incluso dentro del área protegida un factor de erosividad alto. Por otro lado, el escenario de cambio climático, evidencia un comportamiento similar al del escenario de año húmedo con factores de erosividad que varían entre 4,6 y 6,5 MJ.mm. ha.

ERODABILIDAD DEL SUELO: FACTOR K

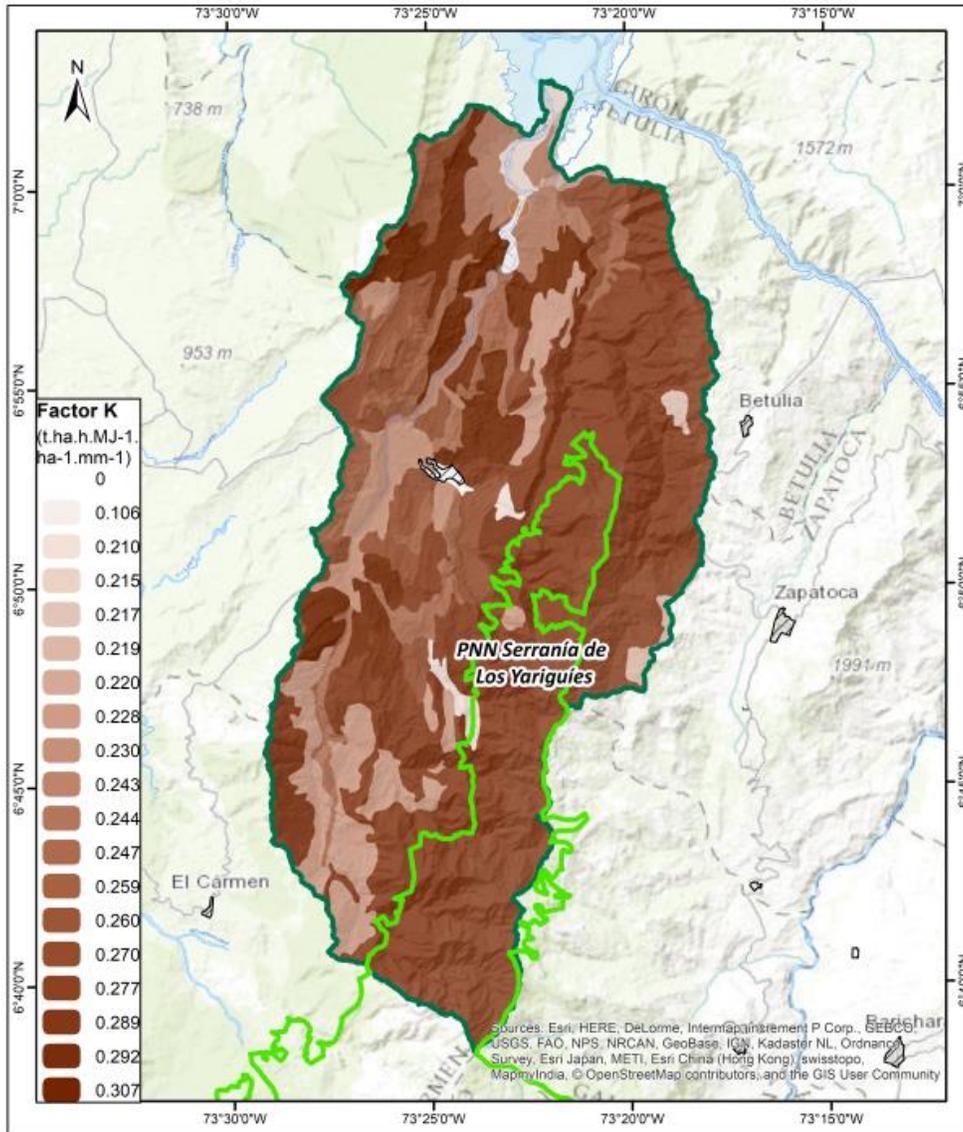
La erodabilidad del suelo es un índice que muestra la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión y depende de las propiedades intrínsecas de cada suelo. Cuanto mayor sea la erodabilidad mayor porcentaje de erosión. Para identificar el índice de erodabilidad del suelo, se tiene en cuenta, en primera instancia las unidades del suelo, tal y como se muestran a continuación:

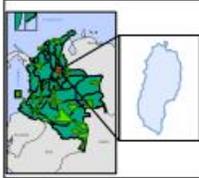
Mapa 10. Unidades de suelos en la zona objeto de estudio



Fuente: este estudio

Mapa 11. Mapeo de erodabilidad del suelo



 <p>Parques Nacionales Naturales de Colombia</p>	<p>CONVENCIONES</p> <ul style="list-style-type: none">  PNN Serranía de Los Yariguíes  Cuenca del Río Chucuri  Embalse Sogamoso  Casco Urbano  Drenaje Doble 	<p>LOCALIZACIÓN GENERAL</p> 
<p>FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (K) CUENCA DEL RÍO CHUCURI PNN SERRANÍA DE LOS YARIGÜES</p>		
<p>Escala: 1:222,574</p> 		

Fuente: Este estudio

Tabla 7. Tabla biofísica

COBERTURA	lucode ⁴	Factor c ⁵
1.1.1. Tejido urbano continuo	1	0,01075
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	2	0,125
2.3.1. Pastos limpios	3	0,05
2.3.2. Pastos arbolados	4	0,05
2.3.3. Pastos enmalezados	5	0,05
2.4.1. Mosaico de cultivos	6	0,125
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	7	0,05
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	8	0,05
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	9	0,05
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	10	0,125
3.1.1. Bosque denso	11	0,0065
3.1.2. Bosque abierto	12	0,0065
3.1.3. Bosque fragmentado	13	0,0065
3.1.4. Bosque de galería y ripario	14	0,001
3.1.5. Plantación forestal	15	0,003
3.2.1. Herbazal	16	0,012
3.2.2. Arbustal	17	0,0165
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	18	0,037
5.1.1. Ríos (50 m)	19	0,0001
9.9. Nubes	20	0,0001

Fuente: este estudio

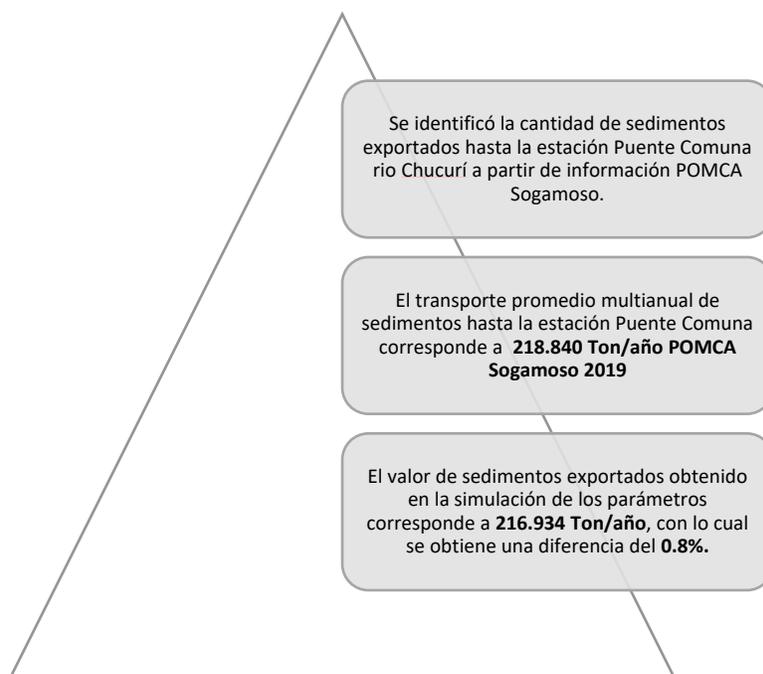
RESULTADOS: CÁLCULO DE SEDIMENTOS RETENIDOS Y EXPORTADOS

El modelo de retención de sedimentos obtenido por medio del software Invest, se calibró con los registros de referencia de la estación Puente Comuna que, de acuerdo con el POMCA del río Sogamoso reporta un transporte promedio multianual de sedimentos que ascienden a 218.840 Ton/año. De acuerdo con los parámetros utilizados en el modelo, el punto de cierre en la estación Puente Comuna reportaría un transporte promedio multianual de sedimentos de 216.934 Ton/año. Es decir, se presenta una diferencia de 0,8%, por lo cual se considera viable aceptar el modelo.

⁴ Codificación asignada a las diferentes coberturas

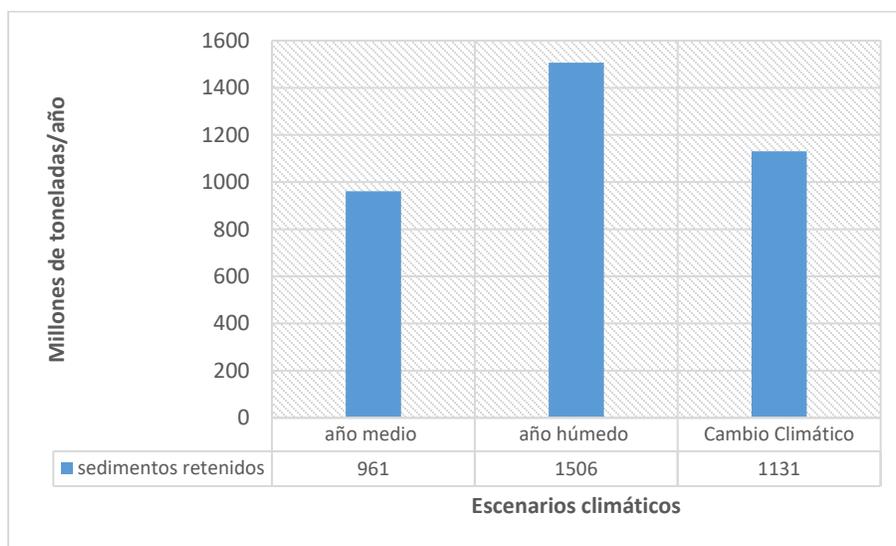
⁵ Factor de manejo del cultivo: refleja el efecto del cultivo y las prácticas de manejo en las tasas de erosión. Expresa la relación de pérdida del suelo de un área con cobertura

Gráfico 9. Sedimentos transportados en estación Puente Comuna



Fuente: este estudio

Gráfico 10. Sedimentos Retenidos asociados al r PNN Yariguíes

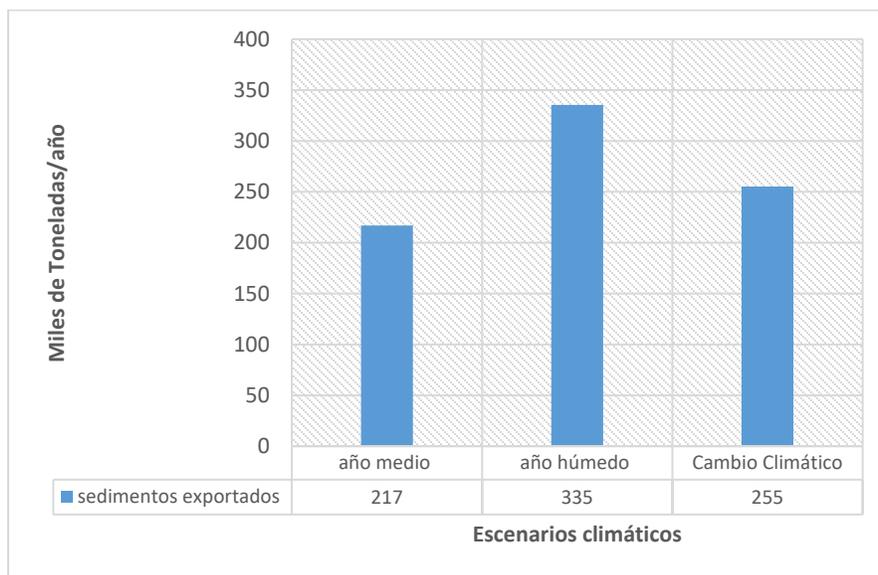


Fuente: este estudio

De acuerdo con los resultados del modelo, se tiene que la cantidad de sedimentos retenidos que corresponde a la diferencia entre la pérdida de suelo que se tendría en condiciones de suelo desnudo en comparación con la pérdida de suelo en las condiciones actuales de uso y cobertura del suelo, para el año medio, asciende a 961 millones de Toneladas por año, mientras que en un escenario de año húmedo se incrementa en un 56,69%, y en un escenario de cambio climático este incremento sería

del 17,6%. De esta manera se puede observar una retención de sedimentos bastante significativa y este servicio ecosistémico tiene especial relevancia en el año húmedo, en donde por el aumento de las precipitaciones podría darse un mayor transporte de sedimentos, no obstante, las coberturas protegidas permiten una mayor retención en dichos eventos.

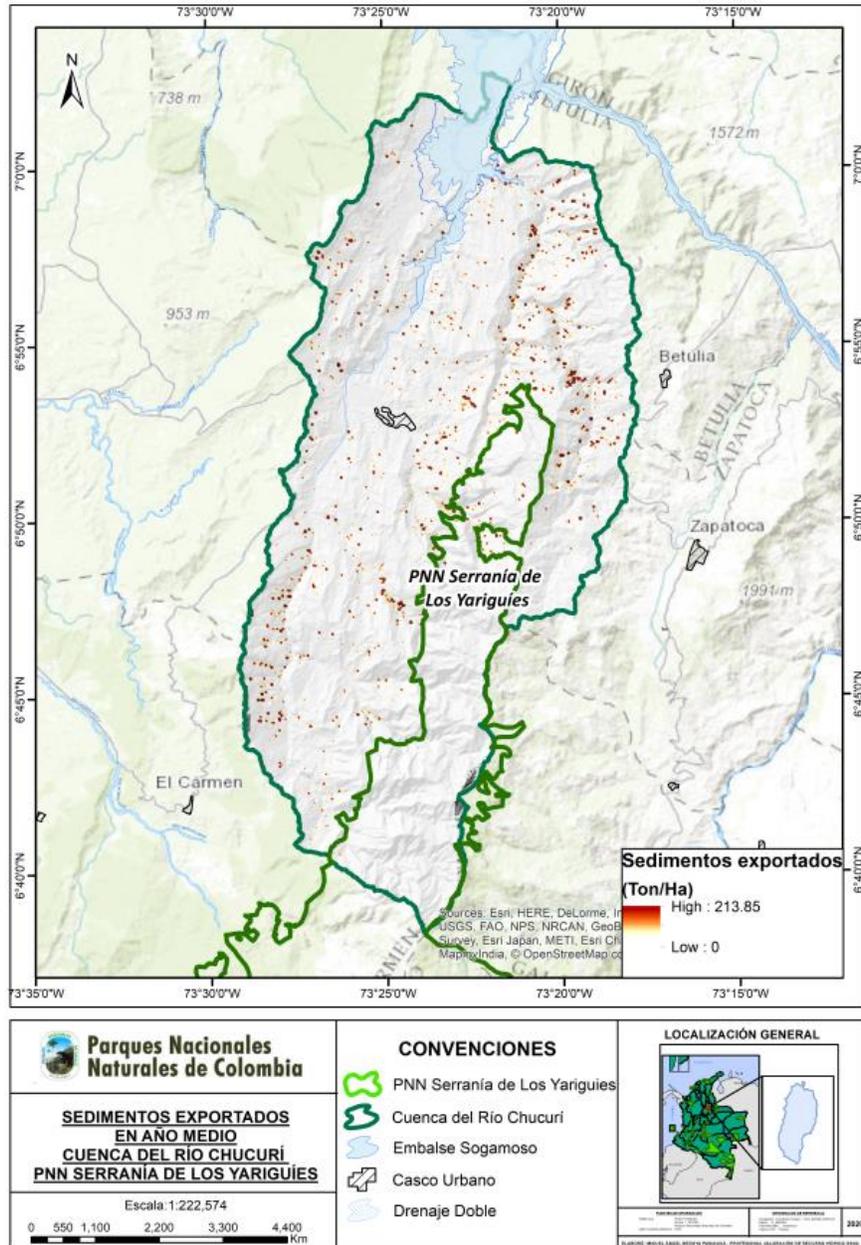
Gráfico 11. Sedimentos exportados



Fuente: este estudio

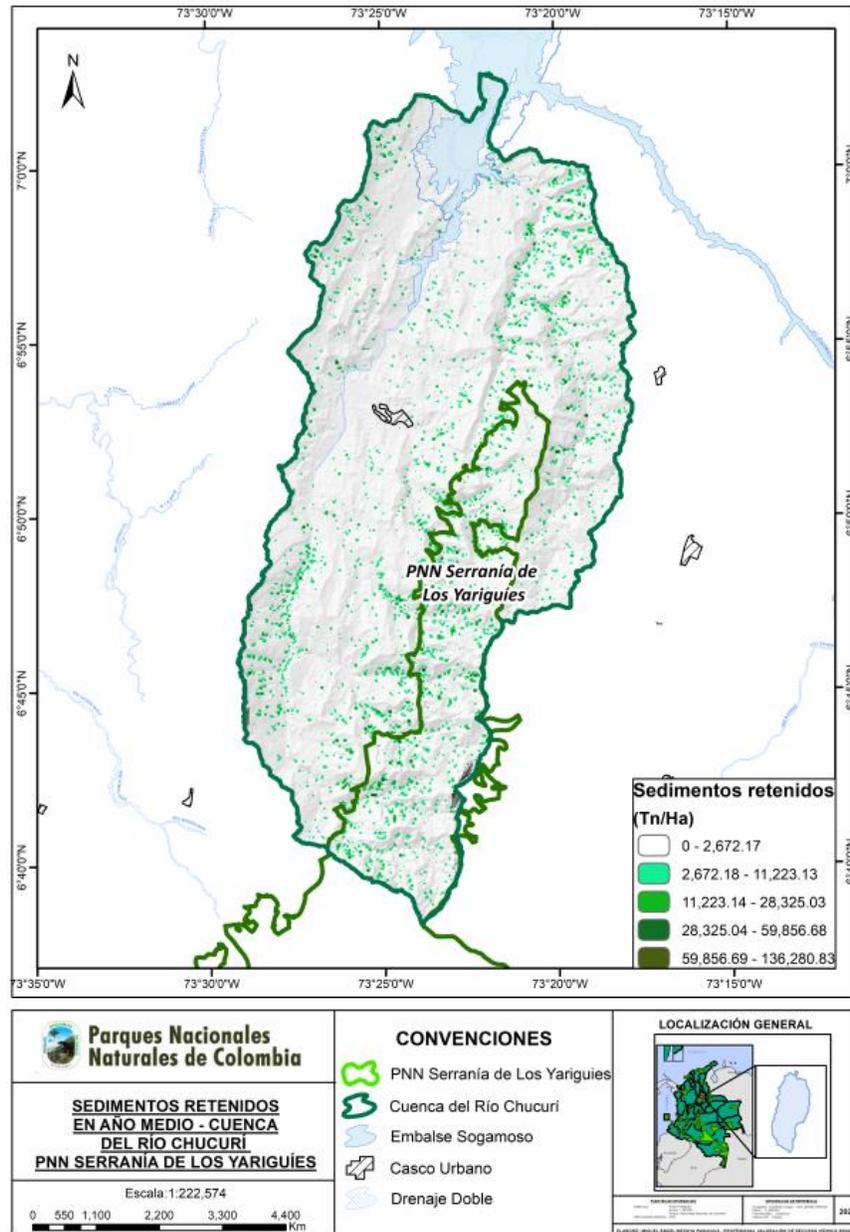
Por otra parte, los sedimentos exportados, considerados como los sedimentos que finalmente van a depositarse a la corriente hídrica, se estima que en año medio podría ascender a 217.000 toneladas/año. Mientras que en paño húmedo esta exportación aumenta un 54%, y en un escenario de cambio climático los sedimentos exportados ascienden un 17%, en comparación con el año medio.

Mapa 12. Mapeo de sedimentos exportados



Fuente: este estudio

Mapa 13. Mapeo de sedimentos retenidos

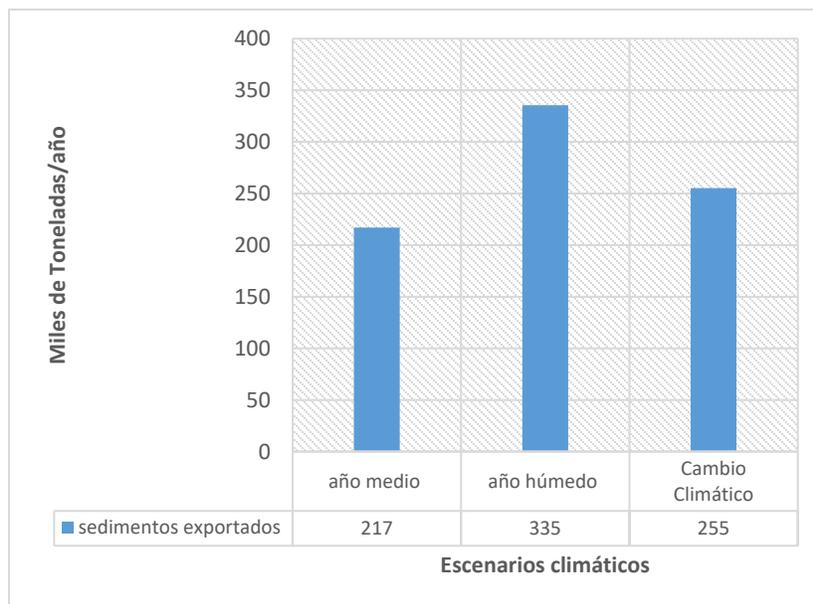


Fuente: este estudio

De acuerdo con los anteriores mapas, se puede evidenciar que los sedimentos exportados se concentran en la parte media-baja de la cuenca por fuera del área protegida, siendo notorio como las áreas de la cuenca con mayores coberturas intervenidas son las que potencialmente están generando mayor exportación de sedimentos. Así mismo, en el mapa de sedimentos retenidos se puede visualizar que estos se concentran al interior del área protegida, demostrando así la importancia que tienen las coberturas y suelos del PNN Yariguies frente al servicio de retención de sedimentos.

Adicionalmente, se cuantifico la retención y exportación de sedimentos simulando un escenario en el que las coberturas naturales del área protegida que corresponde principalmente a bosque denso, cambian a pastos. Bajo este escenario se obtuvieron las siguientes estimaciones:

Gráfico 12. Sedimentos exportados bajo un escenario de transformación de coberturas de bosque denso a pasto



Fuente: este estudio

De acuerdo con la anterior gráfica se tiene que, si las coberturas boscosas del PNN Yariquíes no contaran con la figura de protección y estuvieran susceptibles a procesos de praderización, sin lugar a dudas se vería afectado el servicio de retención de sedimentos, de tal manera que los sedimentos exportados se incrementarían en un 79,6%.

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

METODO DE VALORACIÓN ECONÓMICA:

Teniendo en cuenta que el servicio ecosistémico objeto de valoración corresponde a la retención de sedimentos y que el principal beneficiario de dicho servicio ecosistémico es el proyecto Hidrosogamoso, se utiliza el método de valoración de costos evitados, por medio del cual se estima el beneficio económico que representa para la hidroeléctrica el servicio prestado por el área protegida y que se refleja en los gastos en que incurriría el actor beneficiario para evitar o reducir los efectos ambientales no deseados que se presentan cuando hay una afectación o pérdida del servicio ecosistémico.

En este sentido, se estima un valor monetario asociado al costo de controlar, tratar o remover los sedimentos para el actor beneficiario y para ello se realizó una búsqueda de información para identificar las principales estrategias utilizadas para la remoción de sedimentos. La valoración del servicio ecosistémico de retención de sedimentos estaría representada por la siguiente ecuación:

costos evitados

$$= \text{sedimentos retenidos}(m3) * \text{costo de remoción } m3 \text{ de sedimentos}$$

De acuerdo con Montañez, existen múltiples estrategias para el manejo de sedimentos en los embalses de proyectos hidroeléctricos y en sistemas de acueducto, cuatro de las más utilizadas globalmente son:

- Reducción del aporte de sedimentos aguas arriba del embalse: esta estrategia considera las cuencas tributarias de los embalses y el control sobre el aporte de sedimentos con el fin de reducir la entrada de sedimentos al embalse, principalmente mediante tres grupos de estrategias: Control en los procesos de erosión de la cuenca desde la superficie en el yacimiento, control en los procesos de erosión en el canal y la retención de sedimentos erosionados aguas arriba del embalse (Montañez Guillen, n.d.)
- Control del trayecto de sedimentos o enrutamiento de sedimentos: consiste en mantener el flujo de sedimentos entrante en movimiento evitando su acumulación en el embalse, ya sea pasando la carga de sedimentos alrededor o a través de la zona de almacenamiento (Sumi & Kantoush; Morris, 2015, citado por Montañez). Incluye cualquier método que permita la manipulación hidráulica y/o geometría del embalse reduciendo o enfocando el depósito de sedimentos.
- Remoción de depósitos de sedimentos y lavado de sedimentos: comprende las técnicas que permiten la remoción de los sedimentos acumulados en el embalse (Kantoush & Sumi, 2010, citados por Montañez). Las técnicas son descarga y lavado de sedimentos, y dragados y excavaciones por métodos mecánicos o hidráulicos.
- Medidas de no manipulación de sedimentos (Adaptative Strategies): Esta categoría comprende las estrategias para combatir los impactos de la sedimentación que no implican el

manejo o manipulación de sedimentos (Morris, 2015, citado por Montañez), tales como: Reasignar el almacenamiento y mejorar la eficiencia operativa; Modificar estructuras para evitar sedimentos; Elevar la presa para aumentar el volumen o construir proyecto de reemplazo; Control y conservación de pérdidas de agua e Infraestructura de desmantelamiento.

Para efectos de este ejercicio de valoración se tendrá en cuenta una de las estrategias utilizadas para la gestión de sedimentos y sus costos asociados. La estrategia de remoción de depósitos de sedimentos y lavado de los mismos a través de dragados hidráulicos, es la estrategia que se tendrá en cuenta, dado que ésta es una de las más utilizadas frente a la saturación y reducción de la capacidad de almacenamiento de los embalses.

Se realizó un barrido de información secundaria para identificar los costos asociados al dragado hidráulico, posteriormente se llevó a Valor Presente Neto (2020) los costos de cada una de las estrategias identificadas, con una tasa de descuento del 12%, y finalmente se obtuvo un promedio de costos de remoción, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 8. Costos asociados a Dragados de sedimentos por m³, valor a 2020

ESTRATEGIAS	valor (COP)	Año	VPN 2020 (COP)
Dragado Hidráulico en Calamar	\$ 9.351,00	2017	\$13137,48
Dragado Hidráulico Resto del Canal del Dique	\$ 9.590,00	2017	\$13473,25
Dragado Hidráulico en Pasacaballos	\$ 23.828,00	2017	\$33476,62
Dragado hidráulico y mecánico en el río Magdalena, sector comprendido entre Barrancabermeja (Santander) y Pinillos (Bolívar): DRAGADO CON DRAGA PARTICULAR	\$ 13.115,00	2017	\$18425,63
Dragado hidráulico y mecánico en el río Magdalena, sector comprendido entre Barrancabermeja (Santander) y Pinillos (Bolívar): DRAGADO CON DRAGA PROPIA	\$ 8.108,00	2017	\$11391,15
Dragado hidráulico de corte y succión sector comprendido entre Barrancabermeja (Santander) y Pinillos (Bolívar).	\$ 10.900,00	2017	\$15313,71
Draga Tipo Succión TSHD Shoreway	\$ 1.618,94	2016	\$2547,43
Draga tipo Corte-Succión Orión	\$ 4.338,45	2016	\$6826,63
Draga Succión Ecológica Eco-draga	\$ 11.504,19	2016	\$18102,06
PROMEDIO DE COSTOS ASOCIADOS AL DRAGADO HIDRÁULICO DE SEDIMENTOS POR M3			\$ 14.744

Fuente: este estudio

Luego de identificar el costo de diferentes estrategias de dragado hidráulico y dado que dichos costos fueron identificados en diferentes años, se trae a valor presente cada uno de los costos para poder tener un promedio para el año 2020, el cual se estima asciende a \$14.744 COP por la remoción de 1 metro cúbico de sedimentos. En ese sentido, y dado que la estimación de sedimentos por medio del INVEST se obtuvo en unidades de toneladas, se hace necesario hacer una conversión a m³ y para ello se utiliza la densidad aparente del suelo que corresponde a: 1,426 g/cc o Ton/m³.

Tabla 9. Sedimentos exportados evitados por coberturas del PNN Serranía de los Yariguíes

Cobertura actual	Sedimentos exportados (Ton)
Bosque denso	216.935
Pastos limpios	389.671
Diferencia (sedimentos que representan ahorros)	172.736 Ton
Conversión	121.133 m ³

Fuente: este estudio

De acuerdo con lo anterior se tiene que, en año medio el área protegida PNN Serranía de los Yariguíes retiene aproximadamente 121.133 m³ de sedimentos al año, lo que estaría representando un ahorro económico de \$1.785'984.952 COP⁶ anual.

Adicionalmente, se estimó el beneficio económico que generan las áreas protegidas con el servicio ecosistémico de retención de sedimentos, teniendo en cuenta la vida útil del proyecto hidroeléctrico Hidrosogamoso (50 años). Para ello se estimó el valor futuro, con el fin de identificar el valor alcanzado de los costos evitados estimados luego de 50 años aplicando un interés compuesto. Teniendo en cuenta que la tasa de inflación promedio de Colombia entre los años 2017 y 2020 ha sido de 3.69% anual se estima que el beneficio de los Parques Nacionales Naturales representada en la multiplicación de las utilidades anuales por la vida útil del proyecto ascendería a \$ 10.932.551.183 COP m/cte⁷. De esta manera se tiene dos aproximaciones a saber i) beneficio económico representado en el valor presente neto que equivale a \$1.785'984.952 COP m/cte y ii) una aproximación en término de las utilidades constantes para la vida útil de los sistemas de acueducto (50 años), que asciende a \$10.932.551.183 COP m/cte.

⁶ 494.535 USD

⁷ 3.027.200 USD

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados mostrados en este estudio, se resalta la importancia de conservar los ecosistemas presentes en el PNN Serranía de los Yariguíes, se evidencia los beneficios que presta el área protegida respecto a la retención de sedimentos y así mismo, la importancia de desarrollar programas de restauración o Pagos por Servicios Ambientales PSA que promuevan un cambio en los usos que actualmente están presionando los ecosistemas naturales y el área protegida y consigo los beneficios que presta.
- Los sedimentos retenidos por la cobertura de bosques del PNN Yariguíes para el año medio ascienden a 961 millones de Toneladas, esta retención se incrementa un 56,69% en un escenario de año húmedo, y en un escenario de cambio climático este incremento con respecto al año medio sería del 17,6%.
- Los sedimentos exportados por la transformación de cobertura boscosa a pastos en año medio podrían ascender a 217.000 toneladas/ año. Mientras que en un año húmedo esta exportación aumenta un 54%, y en un escenario de cambio climático los sedimentos exportados ascienden un 17%, en comparación con el año medio
- De ser transformadas las coberturas protegidas que se encuentran al interior del PNN Yariguíes a pastos, la exportación de sedimentos incrementaría un 79,62%
- El beneficio económico que representa el PNN Yariguíes por la retención de sedimentos anual es de \$1.785.163.667 COP, lo cual se traduce en un beneficio futuro por los 50 años de vida útil del proyecto hidroeléctrico Hidrosogamoso que asciende a \$10.927.523.850 COP. Estas cifras representan los costos que se evita el Proyecto Hidrosogamoso en el tratamiento de sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Bedoya, M. Á. (2016). *Valoración del servicio ecosistémico de retención de sedimentos Cuenca del Río Chinchiná – Parque Nacional Natural Los Nevados*. Retrieved from <https://storage.googleapis.com/pnn-web/uploads/2017/06/Informe-de-valoracion-SE-hidrologico-PNN-Nevados-Portada.pdf>
- Castro, L., & Carvajal, Y. (2010). *ANÁLISIS DE TENDENCIA Y HOMOGENEIDAD DE SERIES CLIMATOLÓGICAS*.
- Corporación Autónoma Regional de Santander. (n.d.-a). *Fase De Diagnóstico. Vol I: caracterización básica y del sistema Fisicobiótico. 4*.
- Corporación Autónoma Regional de Santander. (n.d.-b). *Fase De Diagnóstico Documento General Vol . II . Caracterización De Las condiciones sociales. 4*.
- IDEAM. (2015). *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia*.
- Mariño García, R. A. (2016). CARACTERIZACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RANCHERÍA – GUAJIRA, COLOMBIA–. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 110(9), 1689–1699.
- Montañez Guillen, J. E. (n.d.). *Universidad de los Andes - Departamento de Ingeniería Industrial*. Retrieved from <https://catalogo.uniandes.edu.co/es-ES/2017/Catalogo/Facultad-de-Ingenieria/Departamento-de-Ingenieria-Industrial/Undergraduate/Industrial-Engineering-Degree>