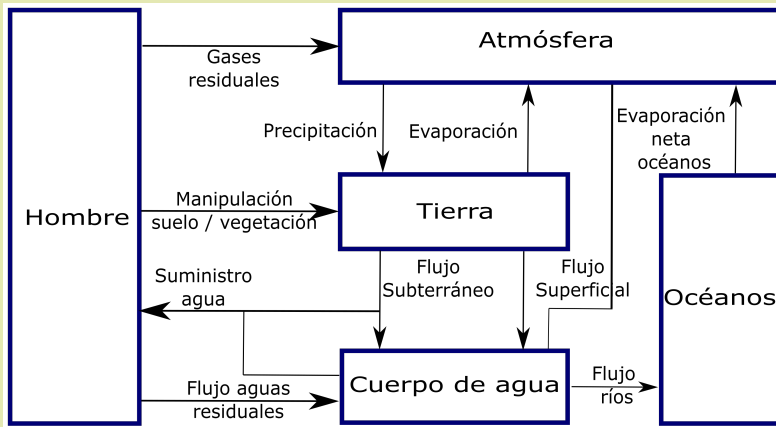


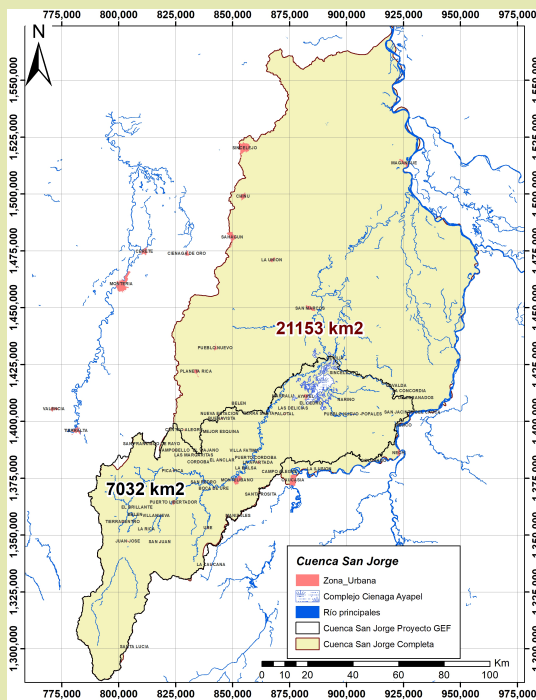
## Modelación hidrológica río San Jorge hasta la ciénaga de Ayapel

Cañón-Hernández, J., Hernández-Castillo, B. E., Díaz-Barrios, M. C., Fuentes-Cabrejo, C. A., Barros-Vanegas, M.

Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH), componente 2 – Gestión de la Salud de los Ecosistemas; Proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive; Fundación Natura, carrera 21 # 39 – 43, Bogotá D. C., Colombia.

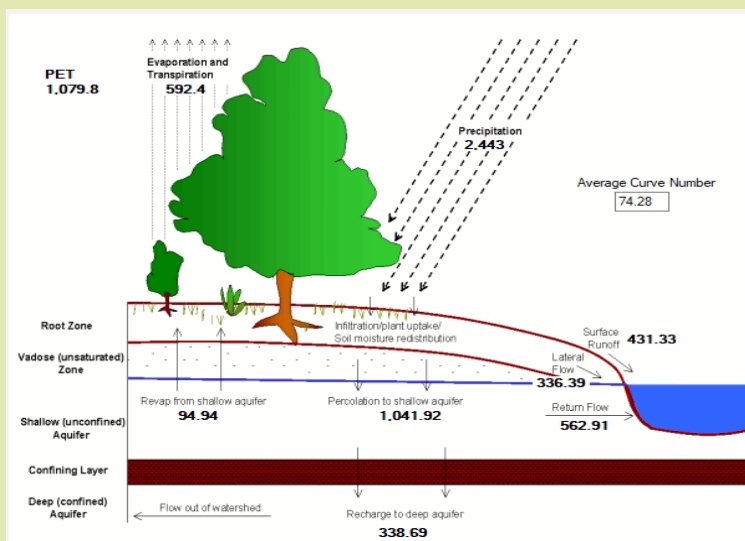


La construcción de los modelos hidrológicos inicia con la comprensión y dinámica del ciclo del agua. El hombre es un factor importante que afecta este ciclo, ya que extrae y manipula las aguas subterráneas y superficiales. La escala temporal usada para la modelación hidrológica abarca meses y años, así como temas entre los que se hallan la oferta hídrica y el cambio climático.

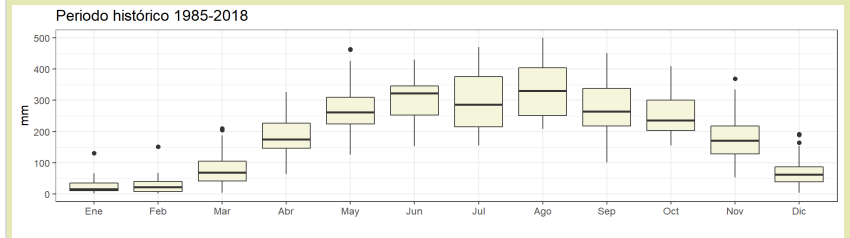
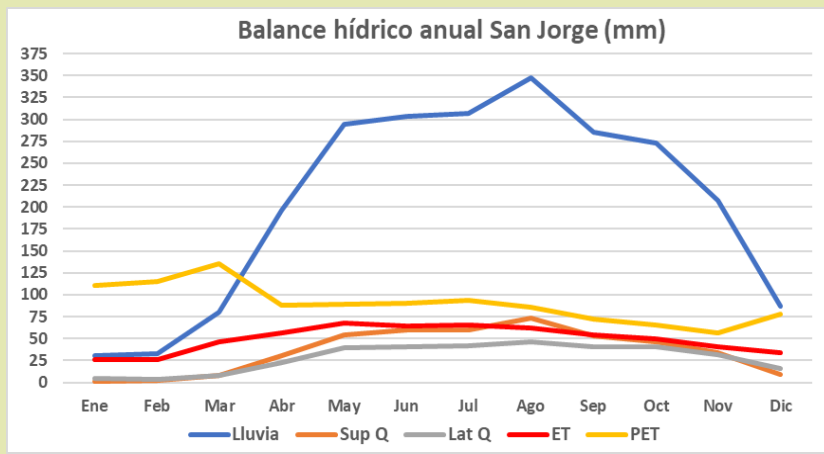


El modelo de la ventana San Jorge tiene un área de **7.032 km<sup>2</sup>**. Fue construido con **42 tipos de suelo**, **tres rangos de pendientes (0-10, 10-37 y 37-,max)** y **quince tipos de coberturas** o uso del suelo dentro de una subdivisión de **74 subcuencas**, acompañado de series de precipitación y temperatura diaria. El modelo fue corrido a escala diaria y calibrado a escala mensual utilizando los datos entre 1985 y 2018, distribuidos así: calentamiento con los dos primeros años, calibración entre 1987-2002 y restante periodo de validación.

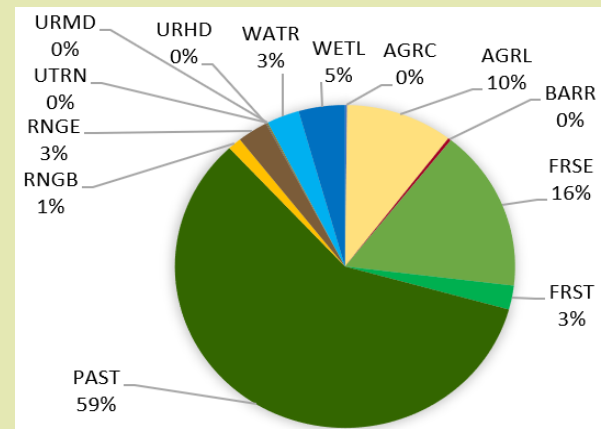
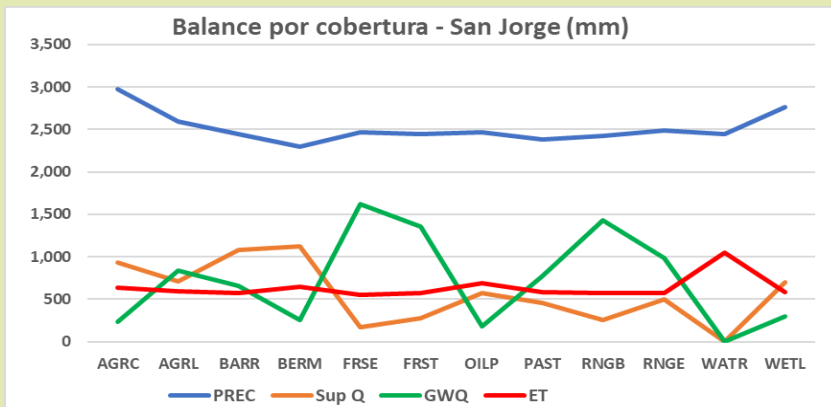
La herramienta Swat, modelo utilizado, incluye el Swat Check, que muestra un resumen final del comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio. Es decir, aporta los valores anuales de los principales componentes. De allí se evidencia una precipitación medial anual de **2443 mm**, de



- **592,4 mm (24% aprox.)** se van en evapotranspiración.
- **1041,9 mm (43%)** se percolan a los acuíferos.
- **336,4 mm (14%)** llegan al cauce por flujo lateral.
- **431,3 mm (18%)** son producto de escorrentía directa.

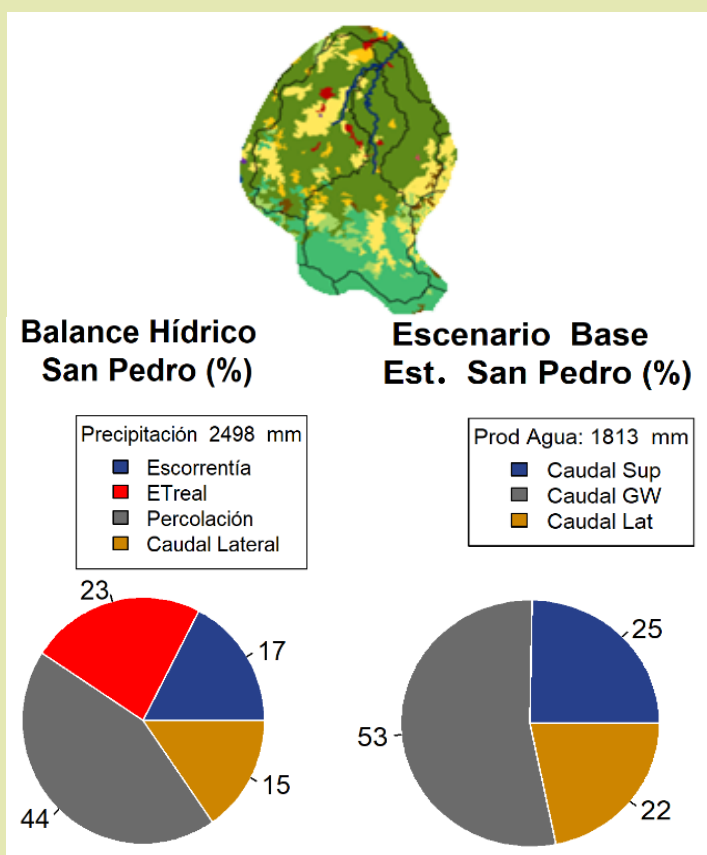


A nivel intraanual se presenta el comportamiento monomodal de los principales componentes del balance hídrico, debido al principal motor: la precipitación. A partir de la lluvia, los caudales laterales, superficiales y evapotranspiración real (actual, según nombre de SWAT) son bajos en los meses secos de diciembre, enero y febrero, y van aumentando, como una campana, con sus valores máximos en agosto.

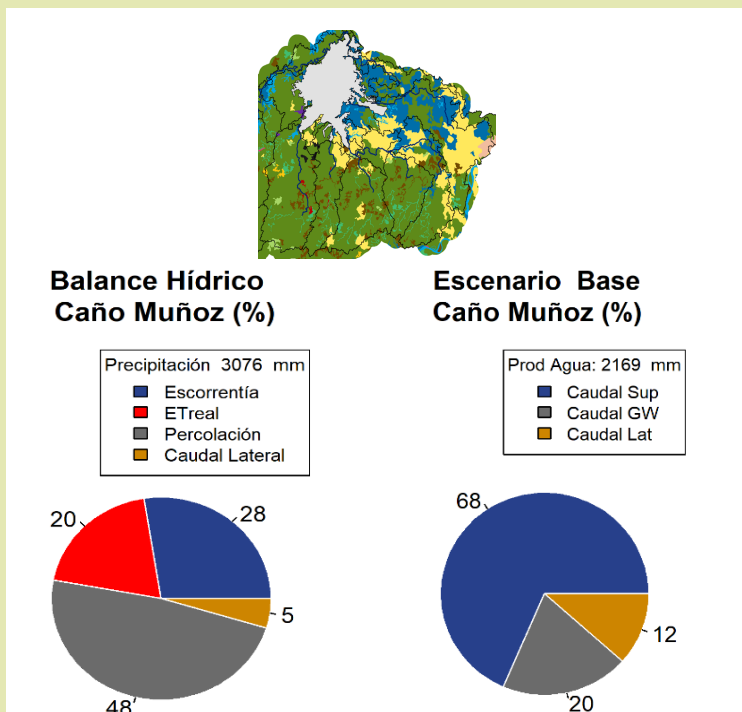
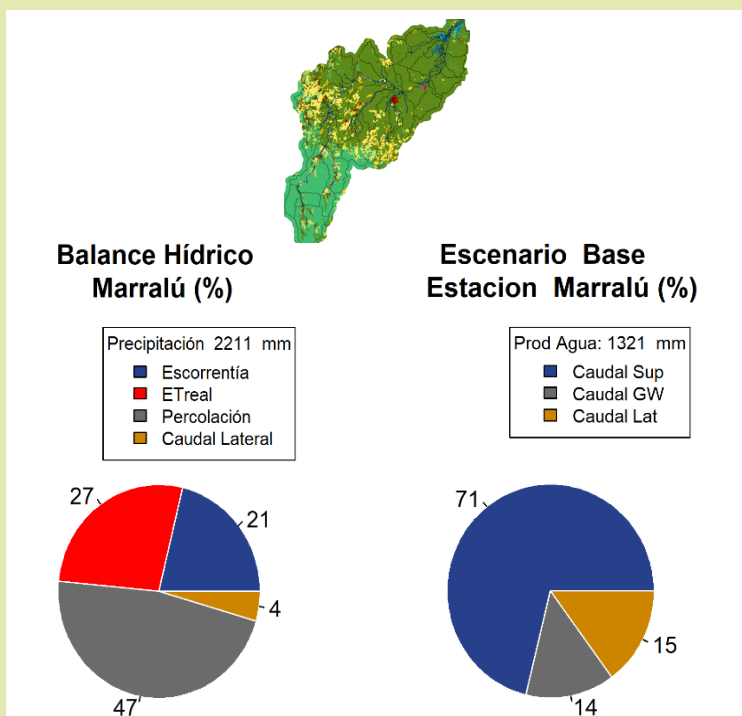
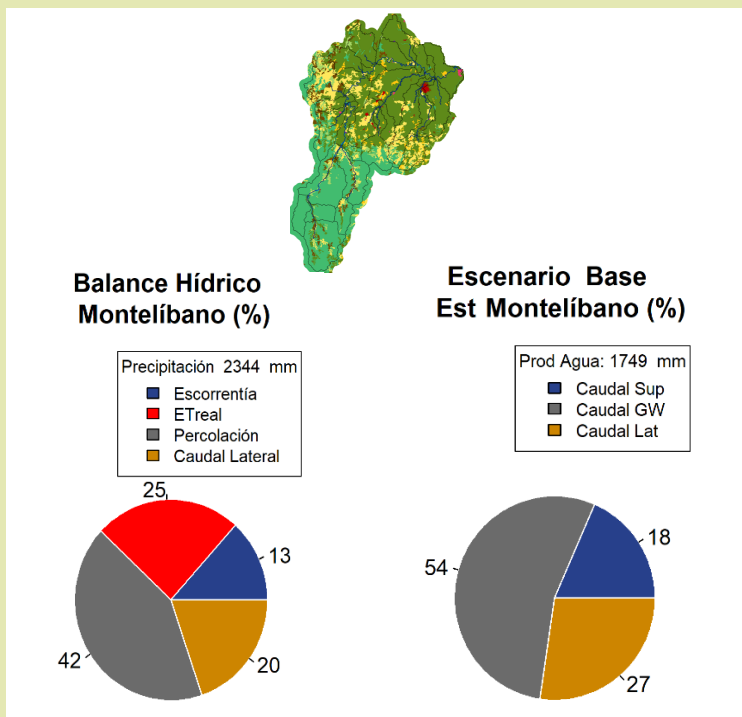


Al observar la respuesta hidrológica del modelo San Jorge, esta se presenta mediante la identificación de la precipitación, evapotranspiración real, escorrentía directa y caudal subsuperficial por tipo de cobertura. Allí, las coberturas altas y densas permiten un mayor caudal subsuperficial y menor escorrentía, frente a coberturas de manto rocoso, afloramientos o de minería en los caudales superficiales, los cuales son mayores.

Se presentan análisis y descripciones de los lugares de interés o puntos de control, aportantes a la ciénaga de Ayapel al ser sitios donde se localizan estaciones hidrométricas utilizadas en el proceso de calibración del modelo. Estos resultados son sobre toda el área aferente a cada punto de control, mas no exclusivamente a la subcuenca, en la cual este lugar de control es su sitio de salida.



- La estación San Pedro registra un caudal medio observado de **25.9 m<sup>3</sup>/s**, que representan **418 km<sup>2</sup>** para el área de las tres subcuencas que la conforman, resultando en un rendimiento hídrico de **5,4 mm** o **62 l/s/km<sup>2</sup>**.
- La cuenca aferente a la estación se caracteriza por tener **46%** del terreno, con pendientes entre **10-37%**. El **26%** presenta pendientes mayores a **36%**, configurando un territorio de altas pendientes y de cuenca alta, en su mayoría, como lo refleja su localización.



- La estación Montelíbano es la más importante por la longitud de la serie y por su localización sobre el río San Jorge y la cantidad de área aferente. Para el Pomca bajo San Jorge el límite de cuenca alta y baja se localiza, aproximadamente, en este sitio de la estación. Como resultado de la modelación, el caudal medio de este punto de control es de **220.3 m<sup>3</sup>/s** con un rendimiento hídrico de **4,8 mm** o **55,7 L/s/km<sup>2</sup>**.

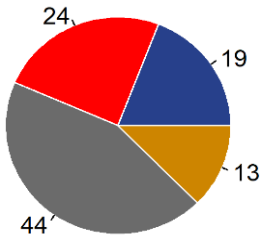
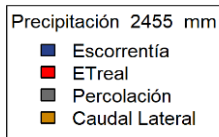
- La estación Marralú registra un caudal medio observado de **273,5 m<sup>3</sup>/s**. Para el área de las **48 subcuencas** que la conforman, esto representa **5.140 km<sup>2</sup>**, resultando en un rendimiento hídrico de **4.6 mm** o **53.2 l/s/km<sup>2</sup>**.

- La cuenca aferente a la estación se caracteriza por tener un 39% de la cuenca en pendientes entre **0 – 10%**, además de tener **34%** del terreno con pendientes entre **10-37%** y el **23%** con pendientes mayores a **37%**, configurando, en su mayoría, un territorio de altas pendientes y de cuenca alta, como lo refleja su localización.

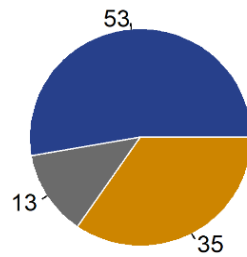
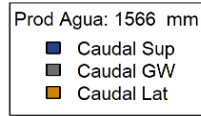
- Junto a estas características topográficas, en la cuenca de la estación Marralú se encuentra **61% de pastos**, **9% en mosaico de cultivos**, **21% de bosque denso**, **3% de bosque fragmentado**, como principales coberturas.

- El caño Muñoz tiene un área aferente de **286 km<sup>2</sup>** en dos subcuencas, con un caudal medio simulado de **19.5 m<sup>3</sup>/s**, produciendo un rendimiento hídrico de **5.9 mm** o **68.2 L/s/km<sup>2</sup>**. Dentro de las características topográficas en la cuenca caño Muñoz se encuentran 27% de pastos, 32% en mosaico de cultivos, 4% de bosque denso, 33% zona pantanosa, como principales coberturas.

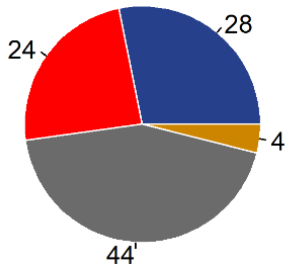
**Balance Hídrico  
Qda Quebradona (%)**



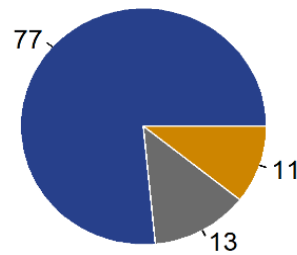
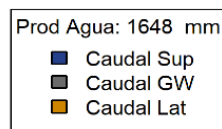
**Escenario Base  
Qda Quebradona (%)**



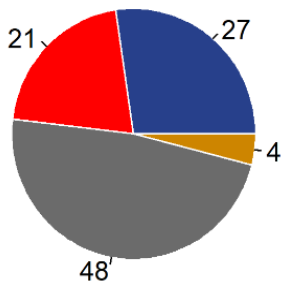
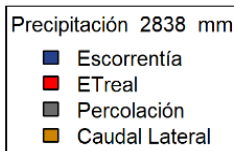
**Balance Hídrico  
Qda Escobillas (%)**



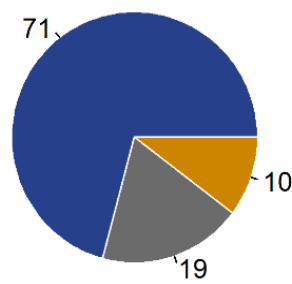
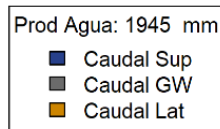
**Escenario Base  
Qda Escobillas (%)**



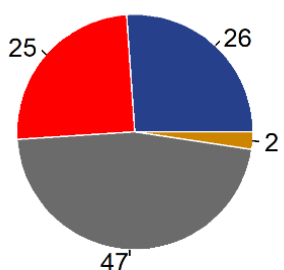
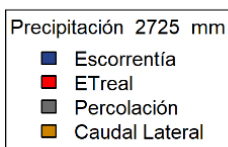
**Balance Hídrico  
Caño Barro (%)**



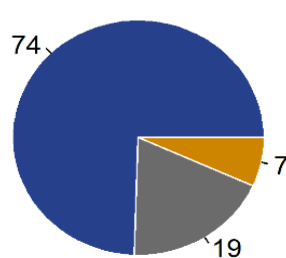
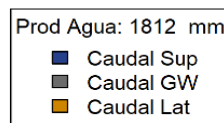
**Escenario Base  
Caño Barro (%)**



**Balance Hídrico  
Caño Gramajo (%)**

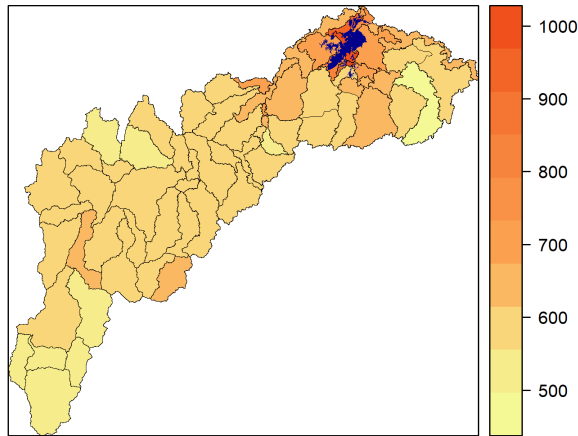


**Escenario Base  
Caño Gramajo (%)**



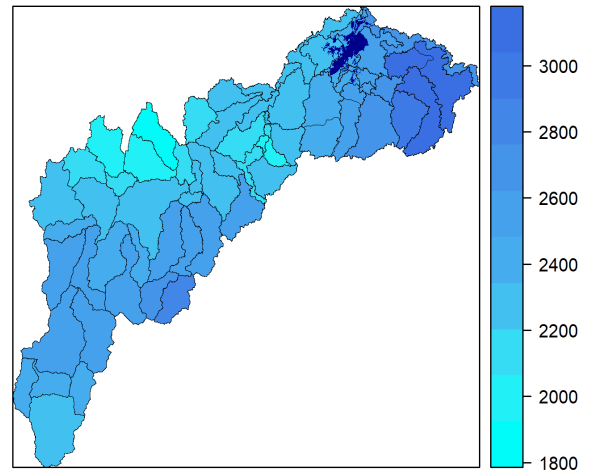
- La cuenca quebrada Quebradona registra un caudal medio simulado de **10,6 m3/s** en dos subcuencas que suman un área de **259 km2**, resultando en un rendimiento hídrico de **3,5 mm** o **40,9 L/s/km2**.
- La topografía de la cuenca se caracteriza por tener un **85% de pastos**, **32% en mosaico de cultivos**, **4% de bosque denso**, **3% de bosque fragmentado**, como principales coberturas.
- La cuenca quebrada Escobillas registra un caudal medio simulado de **5,7 m3/s**.
- Las dos subcuencas que la conforman tienen un área de **131 km2**, resultando en un rendimiento hídrico de **3,8 mm** o **43,5 L/s/km2**. Las características topográficas de la cuenca Escobillas son **79% de pastos**, **10% en mosaico de cultivos**, **3% de bosque denso** y **7% de herbazales**, como principales coberturas.
- La cuenca Caño Barro registra un caudal medio simulado de **33,6 m3/s** para cinco subcuencas que la conforman, con un área de **584 km2**, resultando en un rendimiento hídrico de **5,0 mm** o **43.5 l/s/km2**.
- La topografía de la cuenca está conformada por un **64% de pastos**, **17% en mosaico de cultivos**, **7% de herbazales**, **6% zonas pantanosas** y **4% de bosque denso**, como principales coberturas.
- La cuenca caño Gramajo registra un caudal medio simulado de **5.4 m3/s** en dos subcuencas, para un área **134 km2**, resultando en un rendimiento hídrico de **3.5 mm** o **40.3 L/s/km2**.
- En la cuenca predomina un **38% de pastos**, **20% en mosaico de cultivos**, **3% de cereales**, **33% de zonas pantanosas**, como principales coberturas.

ETmm Modelo SanJorge Escenario Base



Evapotranspiración actual

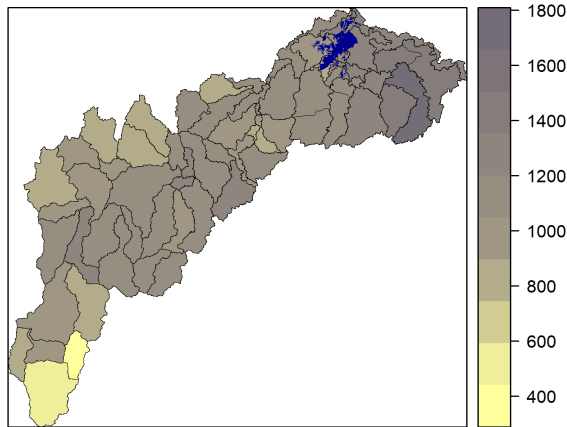
PRECIPmm Modelo SanJorge Escenario Base



Precipitación

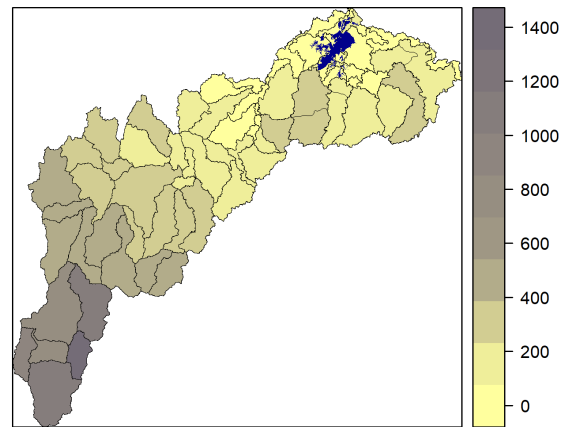
La precipitación alcanza hasta un poco más de los **3.000 mm** anuales en la zona de la margen derecha de la ciénaga de Ayapel, en cercanía de los ríos Cauca y San Pedro. Los valores máximos están próximos al municipio de Montelíbano, en la margen izquierda del río San Jorge. Frente a este impulso hidrológico, y dadas las temperaturas, coberturas y tipos de suelo, la evapotranspiración en San Jorge es mayor en la zona de la ciénaga de Ayapel, en algunas subcuencas aferentes al caño Barro.

PERCmm Modelo SanJorge Escenario Base



Percolación

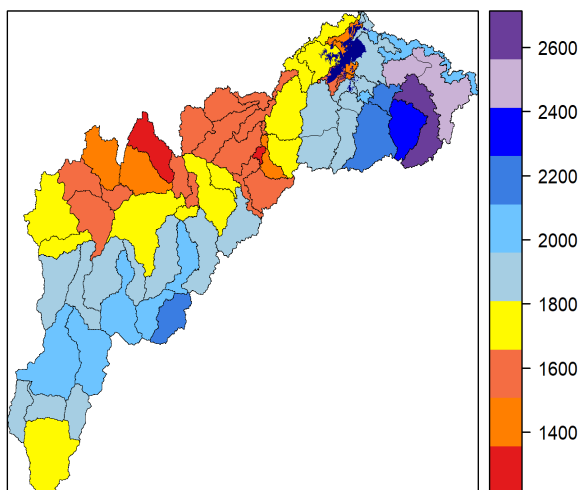
Qlatmm Modelo SanJorge Escenario Base



Caudal

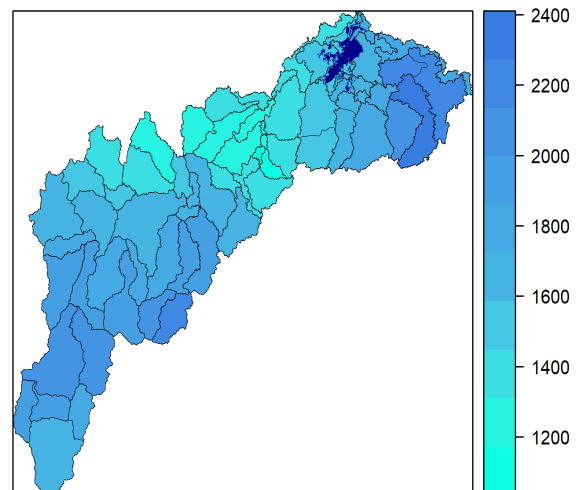
Los aportes de caudal lateral son mayores en la parte alta de la cuenca, ubicada geográficamente al sur. En estas cuencas se permite, en promedio, hasta **1400 mm** de flujo medio anual. La zona del valle del río San Jorge y la oriental aferente a la ciénaga de Ayapel muestran mayores valores de percolación.

ESC\_OHTS Modelo SanJorge Escenario Base



Oferta hídrica total superficial

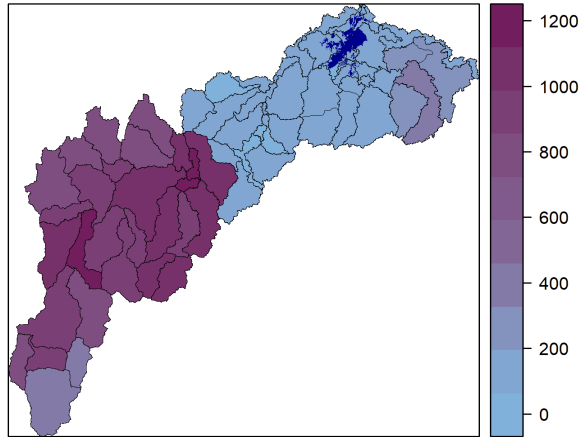
WYLDmm Modelo SanJorge Escenario Base



Producción de agua

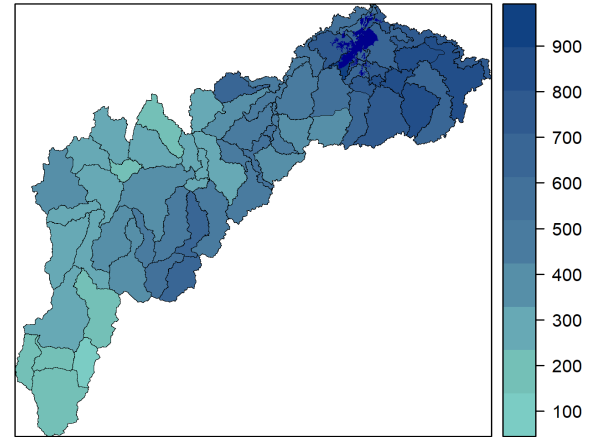
Anualmente se alcanzan subcuencas con **2600 mm** cerca a El Polvillo, La Moneda y Angostura, y zonas de menor oferta hídrica aguas abajo de Montelíbano, junto a La Apartada y Villa Fátima. A nivel mensual, cuando es tiempo seco, la oferta es muy similar en todo el territorio y las diferencias se marcan más en tiempo de inicio y de mayores lluvias, como se percibe de abril a noviembre. La producción de agua está determinada por la escorrentía superficial + flujo lateral y flujo de retorno.

GW\_Qmm Modelo SanJorge Escenario Base



Caudal subsuperficial (mm)

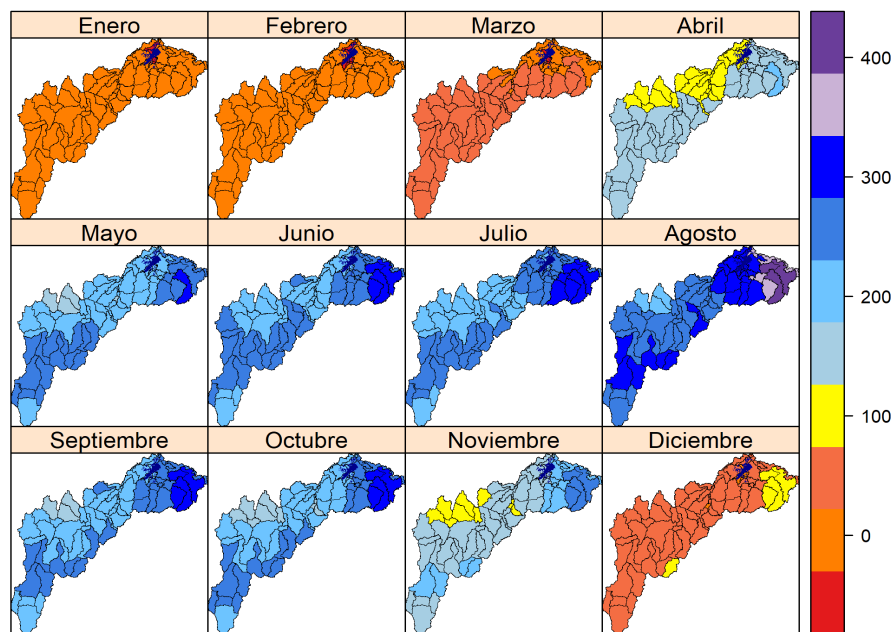
SURQmm Modelo SanJorge Escenario Base



Escorrentía superficial (mm)

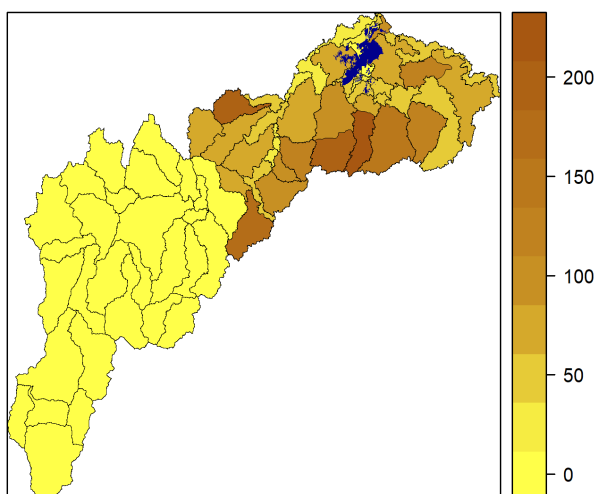
El caudal subsuperficial es mayor en la parte alta de la cuenca, hasta cercanías del municipio de Montelíbano y otra zona del caño Muñoz y caño Gramajo. En la parte alta de la cuenca permite mayores caudales subsuperficiales.

Oferta hídrica TS (mm) SanJorge Escenario Base



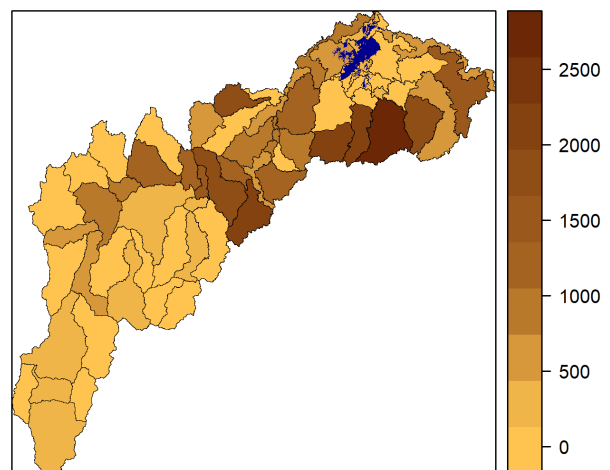
Anualmente se alcanzan subcuencas con **2600 mm** cerca a El Polvillo, La Moneda y Angostura y zonas de menor oferta hídrica aguas abajo de Montelíbano, junto a La Apartada y Villa Fátima. A nivel mensual, cuando es tiempo seco, la oferta es muy similar en todo el territorio y las diferencias se marcan más en tiempo de inicio y de mayores lluvias, como se percibe de abril a noviembre.

SYLDt\_ha Modelo SanJorge Escenario Base



Producción de sedimentos

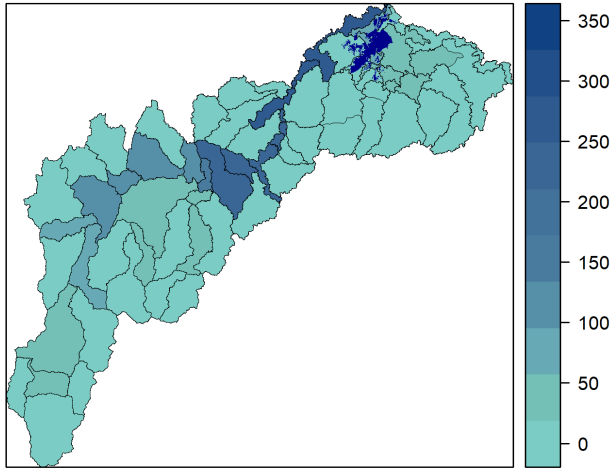
Sed\_ktn Modelo SanJorge Escenario Base



Carga de sedimentos

La producción y la tasa de producción de sedimentos se asemejan un poco porque se desarrolla más en la parte baja del territorio y aferente a la ciénaga de Ayapel, con valores de **200 t/ha**. La carga de sedimentos demuestra los mayores transportes a lo largo del río San Jorge, al incluir las subcuencas antecedentes.

## Q\_m3\_s Modelo SanJorge Escenario Base

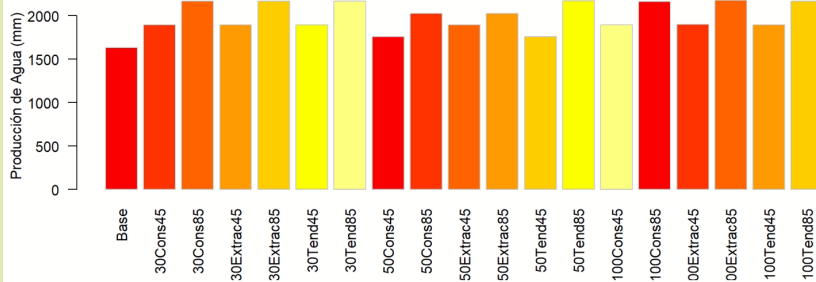


La variable caudal (**m<sup>3</sup>/s**) sobre la cual las subcuencas sobre las cuales pasa el río San Jorge van acumulando todo el drenaje de la cuenca sobre esta corriente y que van marcando en un tono más oscuro el camino del río, desde la parte alta, hasta pasar junto a la ciénaga de Ayapel.

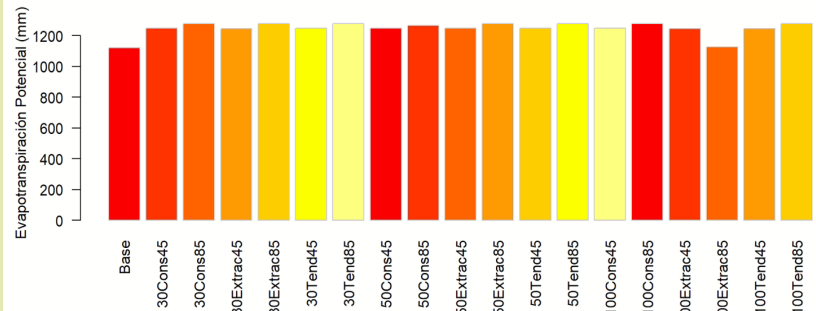
## Escenarios

Las simulaciones de proyecciones son de aproximadamente 94 años (2006-2100s). Se decide crear tres periodos de análisis conformado así: **periodo del 30 (2019-2039)**, **periodo del 50 (2040-2069)** y **periodo del 100 (2070-2100)**. Con estos periodos se evita que los resultados de 94 años atenúen algún periodo alto o de valores altos. Además, cuanto más al futuro se simulen o generen datos, la incertidumbre aumenta y quizás pueda alterar los valores de las proyecciones más cercanas a la fecha actual, o a los años cercanos de la década del 2020-2029.

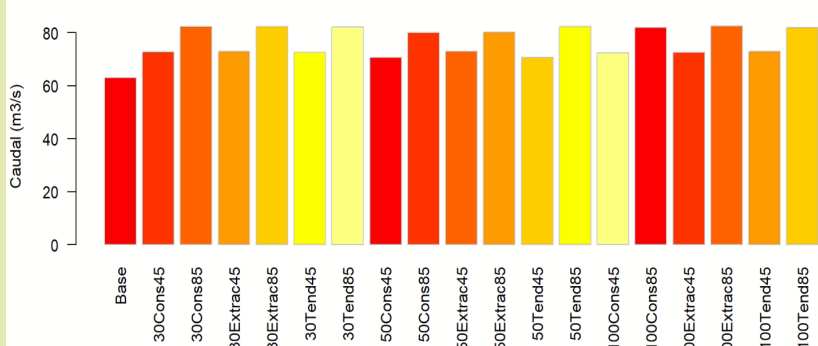
Producción de Agua (mm) de Escenarios 2006-2099 y modelo Base en SanJorge



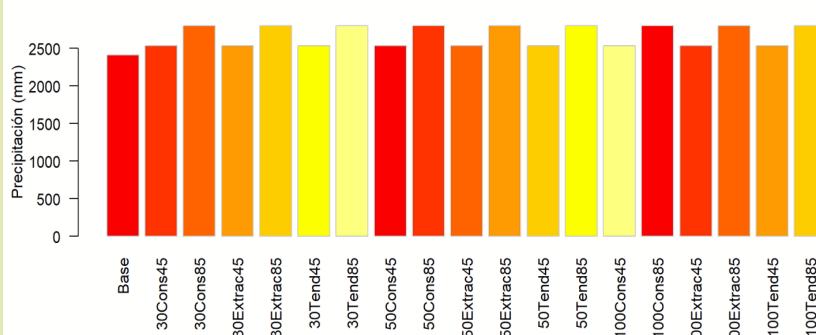
Evapotranspiración Potencial (mm) de Escenarios 2006-2099 y modelo Base en SanJorge



Caudal (m<sup>3</sup>/s) de Escenarios 2006-2099 y modelo Base en SanJorge



Precipitación (mm) de Escenarios 2006-2099 y modelo Base en SanJorge

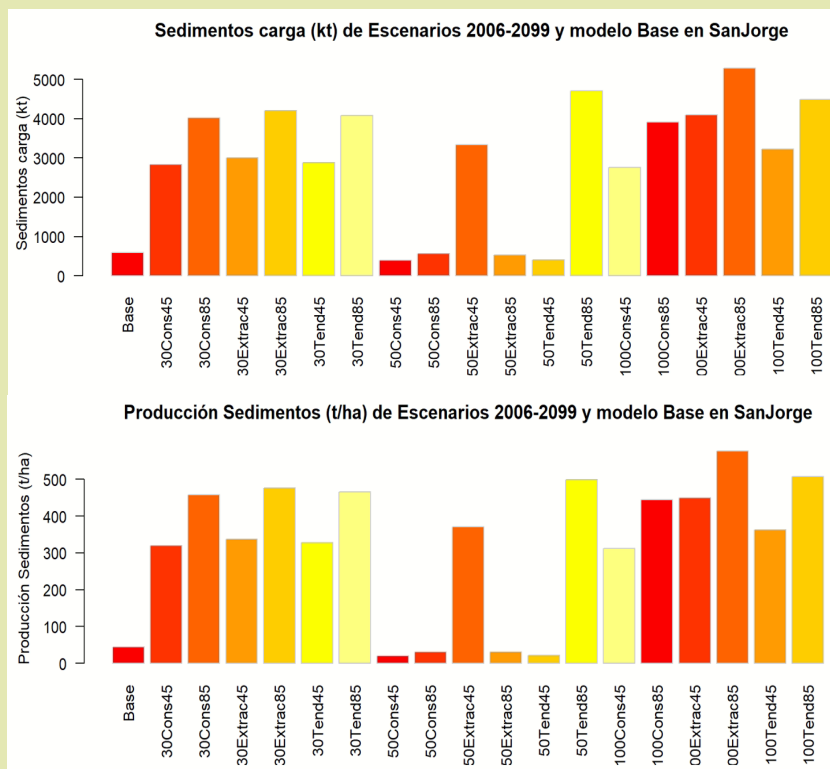


- La producción de agua del modelo base fue de **1500 mm** y los valores de los escenarios, en su mayoría, fueron mayores en **300 mm** y hasta **500 mm** más que el periodo base, exceptuando el modelo **100tend45**.

- La evapotranspiración media anual del modelo base es de **600 mm** y la de todos los escenarios es superior entre **10 y 15%**. Además, los resultados por periodos en muy similar frente a la simulación completa de 2006-2098.

- Los caudales superficiales promediados en el periodo base son de **60 m<sup>3</sup>/s**. Todos los demás escenarios presentaron un incremento de este caudal de hasta **20 m<sup>3</sup>/s**, en términos generales, justificado en el aumento de la precipitación. Una excepción al incremento del caudal se presentó en el escenario **100tend45**, debido a un error en el ingreso de la precipitación de este escenario.

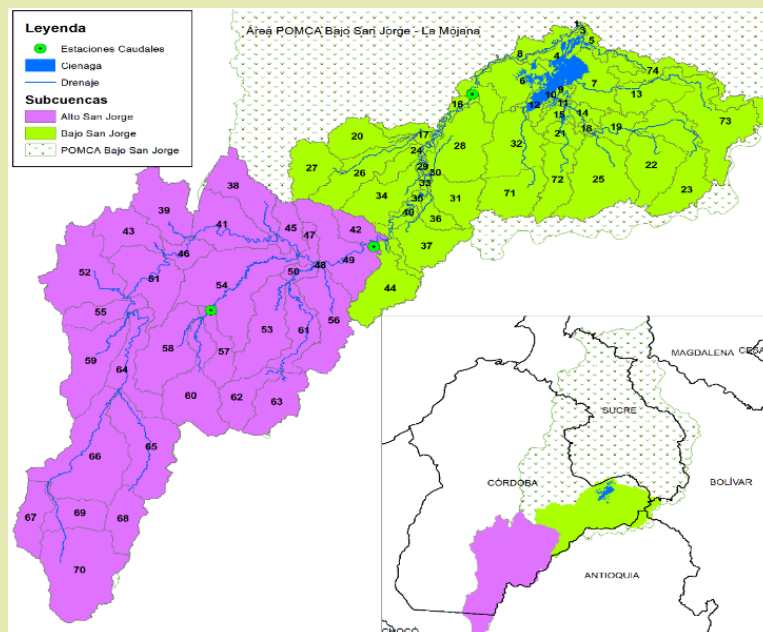
- La precipitación indica que los valores bajos del escenario **100Tend45** corresponden a un error de asignación de esta carpeta, dentro de la herramienta hidrológica. Por otro lado, las precipitaciones son mayores hasta un **10%** con respecto a los datos históricos del modelo base.



Desde las variables vistas, se analiza el comportamiento de los sedimentos, tanto en carga (kT) como en producción (T/Ha), con el fin de evidenciar cómo se ve afectado este componente a partir de los cambios hidrológicos simulados.

El modelo base simuló una carga alrededor de **600 kT**, año promedio anual de todas las subcuencas, y este valor es cercano en cinco escenarios relacionados con las coberturas del año 2050. Ellos son: **50Cons45, 50Cons85, 50Extrac45, 50Extrac85 y 50Tend45**. En situación opuesta, los demás escenarios están produciendo hasta seis o siete veces más sedimentos. Ahora se inicia la búsqueda del componente hidrológico que está generando o permitiendo transporte y producción de sedimentos.

Sobre la zona baja de toda la cuenca del río San Jorge se formuló el Pomca Bajo San Jorge en 2015, en el cual, la zona verde del proyecto Fundación Natura coincide con ese Pomca. Se realiza un contraste entre la información estimada en el Pomca y la del proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive (GEF MCV) de la Fundación Natura.



Subcuenca	ET Real (mm)	Precipitación (mm)	Escurrentía (mm/año)	Área (ha)	Caudal (m3/s)	PET (mm)
Quebrada <u>Quebradona</u>	602.6	2455.2	533.8	25946.0	10.6	1117.1
Quebrada Escobillas	616.3	2565.7	764.9	13169.8	5.7	1115.1
Caño Barro	618.7	2614.9	817.5	58433.5	33.7	1117.5
Caño Muñoz	602.5	3075.1	829.3	28623.4	19.5	1191.7

Se encontró una diferencia entre las estimaciones del Pomca y los resultados obtenidos en el proyecto GEF-MCV, relacionados con los valores de la evapotranspiración real, ya que en el POMCA rondan los 1100 mm, frente a los 600 mm del GEF-MCV. De hecho, las magnitudes mayores se asemejan a la estimación de la evapotranspiración potencial.

## Agradecimientos

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) por su participación activa en el ejercicio de modelación hidrológica; al equipo del Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH) del componente 2: Gestión y Salud de los Ecosistemas.

