
Reporte de Actividad 2.2.2

Simulación de series temporales de caudales
en las cuencas de estudio de la Zona Norte

Proyecto

C-INV-AG-007

Modelación hidrológica de cuencas incorporando las mejores
prácticas agrícolas en el cultivo de palma de aceite

Autores

Andrea Zabala
Carlos Ricardo Bojacá

Área de Geomática

Cenipalma

Septiembre 2026



1. Introducción

En el marco del proyecto *Modelación hidrológica de cuencas incorporando las mejores prácticas agrícolas en el cultivo de palma de aceite* (C-INV-AG-007), la actividad 2.2.2 tiene como objetivo ejecutar el modelo hidrológico HydroBID calibrado para generar series temporales de caudales simulados en el período 1984 a 2023. Las simulaciones se realizan sobre las tres cuencas de estudio de la Zona Norte del departamento del Magdalena: Río Aracataca, Río Frío y Río Sevilla, y Río Fundación, con datos climáticos de la plataforma ColOpenData y los parámetros optimizados mediante Evolución Diferencial (DEoptim) con el KGE compuesto como función objetivo.

A partir de las series simuladas se extraen los resultados de los 28 COMIDs estratégicos identificados en la actividad 2.2.1, se verifica la partición física del balance hídrico, se documenta el desempeño del modelo frente a las estaciones del IDEAM, se calculan indicadores hidrológicos de referencia y se caracteriza el régimen hidrológico.

2. Metodología

2.1. Modelo hidrológico

El modelo HydroBID implementa el método GWLF (*Generalized Watershed Loading Functions*) para la simulación hidrológica a paso diario. El motor de cálculo está desarrollado en C++ e integrado a R mediante Rcpp, lo que permite simular las 54 subcuencas durante 40 años en tiempos del orden de segundos. Para cada subcuenca y cada día el modelo resuelve:

- Evapotranspiración potencial (PET) por el método de Hamon. La fórmula de Hamon entrega centímetros por día, de modo que la PET se convierte a milímetros antes de entrar al balance de humedad del suelo.
- Partición de la precipitación en escorrentía directa e infiltración por el método del Número de Curva (CN) del SCS, con ajuste por la humedad antecedente de los 5 días previos.
- Balance de humedad del suelo con evapotranspiración real, percolación y recarga del acuífero somero.
- Flujo base desde el almacenamiento subterráneo con coeficiente de recuperación (`rec_coeff`) e infiltración profunda (`seep_coeff`).
- Propagación de caudales aguas abajo según el ordenamiento topológico de la red de drenaje.

2.2. Datos climáticos

Se utilizaron datos climáticos diarios de precipitación y temperatura de la plataforma ColOpenData para el período 1984-01-01 a 2023-12-31, asignados a cada uno de los 54 COMIDs del área de estudio. El conjunto comprende 788 940 registros (54 COMIDs por 14 610 días).

2.3. Calibración y validación

Los parámetros se optimizaron con Evolución Diferencial (DEoptim) y validación cruzada temporal, con el KGE compuesto (combinación del KGE estándar y del KGE sobre caudales en escala logarítmica) como métrica objetivo. La optimización se hizo por cuenca, ajustando cuatro parámetros de forma uniforme para todas sus subcuencas: la capacidad del almacenamiento superficial

U_{cap} (límites 10 a 300 mm), los coeficientes rec_coeff y $seep_coeff$ (este último entre 0 y 0.05) y un factor multiplicador del Número de Curva de referencia de cada subcuenca. Para la función objetivo y la validación se usaron únicamente los días con dato medido por el IDEAM; los días completados por interpolación, regresión entre estaciones o bosques aleatorios en la serie de caudales se excluyeron de ambas etapas. El registro de cada estación se dividió de forma secuencial: el 70 % inicial de los días medidos para calibración y el 30 % final para validación (Tabla 4). La estación Puente Sevilla, en el mismo COMID que Canal Florida y también aguas abajo de las derivaciones del río Sevilla, se excluyó de la calibración.

La Tabla 1 presenta los valores optimizados y el KGE compuesto por cuenca. En las tres cuencas U_{cap} quedó en el límite inferior del rango de búsqueda (10 mm): el ajuste favorece un almacenamiento superficial de muy poca retención, valor físicamente posible pero situado en el borde del espacio de parámetros, lo que se deja documentado como una limitación de la calibración. El coeficiente de infiltración profunda resultó inferior a 0.01 en las tres cuencas.

Tabla 1: Parámetros optimizados y desempeño del modelo HydroBID por cuenca. El CN se expresa como factor multiplicador del Número de Curva de referencia de cada subcuenca.

Cuenca	U_{cap} (mm)	rec_coeff	$seep_coeff$	Factor CN	KGE_{cal}	KGE_{val}
Río Aracataca	10	0.0076	0.0097	0.937	0.48	0.44
Río Frío y Río Sevilla	10	0.0200	0.0008	0.982	0.29	0.44
Río Fundación	10	0.0148	0.0036	0.952	0.52	0.49

U_{cap} : capacidad del almacenamiento superficial; rec_coeff : coeficiente de recuperación del acuífero; $seep_coeff$:

coeficiente de infiltración profunda; KGE_{cal} y KGE_{val} : Kling-Gupta Efficiency compuesto en calibración y validación, promediado sobre las estaciones de la cuenca.

2.4. Alcance y supuestos

- La PET de Hamon se usa en milímetros por día; de ella depende la partición entre evapotranspiración real, escorrentía y recarga.
- La calibración y la validación usan sólo los días medidos por el IDEAM. Los días completados por interpolación, regresión o bosques aleatorios se excluyen de la función objetivo y de las métricas; sí aparecen en los hidrogramas para dar continuidad visual a la serie observada.
- Los cuatro parámetros son uniformes dentro de cada cuenca. Las diferencias de caudal entre subcuencas de una misma cuenca reflejan el clima interpolado y el área acumulada, no propiedades calibradas por subcuenca.
- El caudal simulado de cada COMID es enrutado: incluye todo lo que llega de aguas arriba. Los promedios por cuenca sobre los COMIDs estratégicos dependen de la posición de esos COMIDs en la red.
- El modelo simula caudal natural: no representa captaciones, derivaciones ni retornos de riego. Por eso una estación situada aguas abajo de derivaciones, como Canal Florida en el río Sevilla, mide un caudal ya reducido y no es directamente comparable con la simulación.
- El primer año de simulación se descarta como calentamiento y la condición inicial de caudal es la misma para todas las subcuencas.

2.5. Configuración de la simulación

- **Período de simulación:** 1984-01-01 a 2023-12-31 (14 610 días).
- **Período de calentamiento:** el primer año (1984), descartado del análisis.
- **Período útil de análisis:** 1985 a 2023 (39 años).
- **Subcuencas simuladas:** 54 COMIDs en tres cuencas (9 Aracataca, 21 Frío-Sevilla, 24 Fundación).
- **COMIDs estratégicos:** 28 subcuencas seleccionadas en la actividad 2.2.1.
- **Caudal inicial:** 10 m³/s por subcuenca.

2.6. Indicadores hidrológicos

Para cada COMID estratégico se calcularon, a partir de las series diarias del período útil, el caudal medio, la mediana y la desviación estándar; los caudales característicos Q_{10} , Q_{50} , Q_{90} y Q_{95} (excedidos el 10, 50, 90 y 95 % del tiempo); los índices Q_{90}/Q_{50} y Q_{10}/Q_{50} ; el coeficiente de variación (CV) y la curva de duración de caudales completa.

3. Resultados

3.1. Mapa de referencia

Las tres cuencas se ubican en la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. La Figura 1 presenta los 28 COMIDs estratégicos con su código, diferenciados por cuenca.

Subcuencas COMID estratégicas para simulación hidrológica

28 COMIDs seleccionados en las 3 cuencas de estudio - Zona Norte

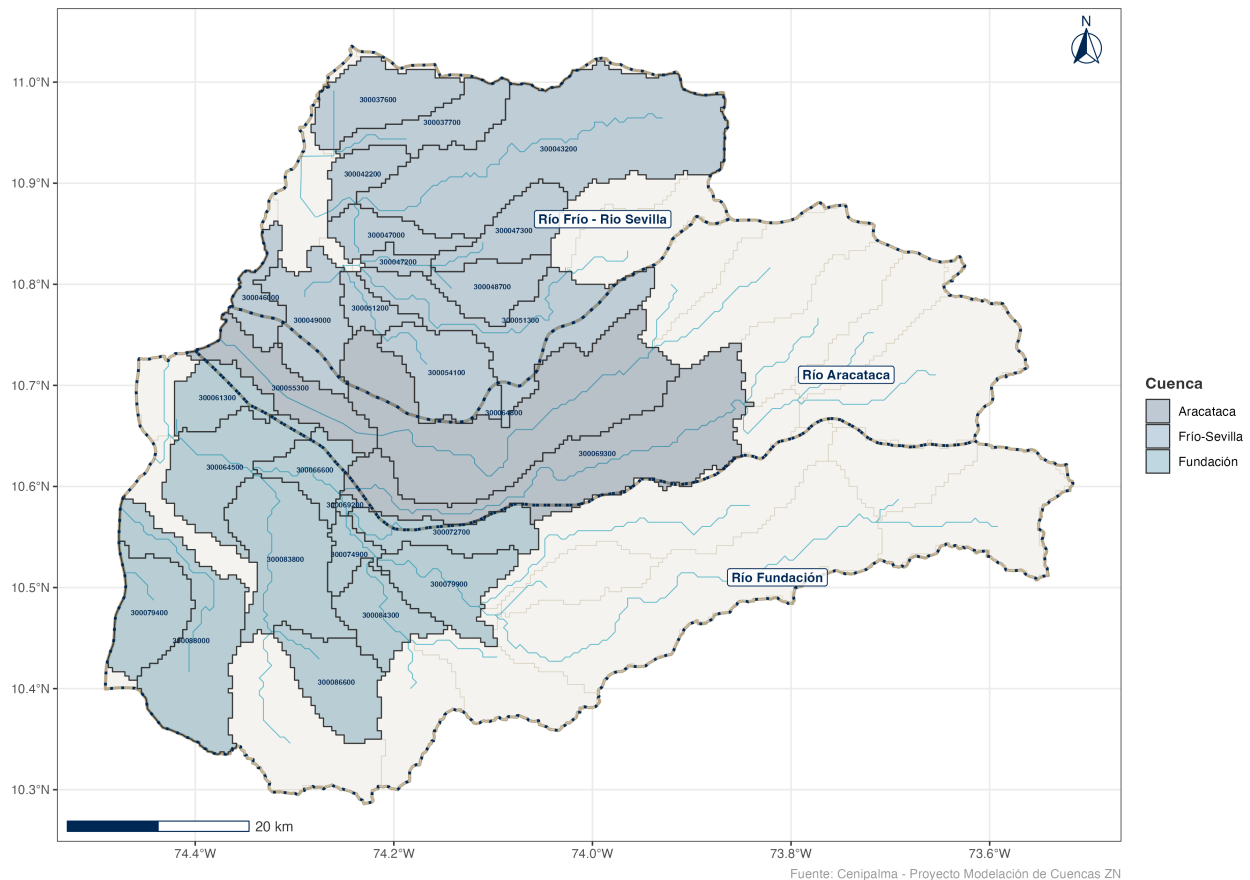


Figura 1: Subcuencas COMID estratégicas para la simulación hidrológica en las cuencas de estudio de la Zona Norte. Se muestran los 28 COMIDs seleccionados con su código, coloreados por cuenca.

3.2. Verificación física del balance

Antes de usar las series se comprobó que la partición del balance hídrico simulado sea físicamente plausible para el Caribe colombiano. La Tabla 2 resume, por cuenca, los promedios anuales del período útil de lluvia, PET, evapotranspiración real, rendimiento hídrico (escorrentía más flujo base sobre lluvia) y pérdida por infiltración profunda. La evapotranspiración real es la principal salida del balance, entre 45 % y 48 % de la lluvia; el rendimiento va de 25 % en Aracataca a 52 % en Frío-Sevilla, y la pérdida profunda alcanza 30 % de la lluvia en Aracataca, con valores mucho menores en las otras dos cuencas. El script de simulación detiene la ejecución si alguno de estos cocientes sale del rango plausible.

Tabla 2: Balance hídrico medio anual simulado por cuenca (mm/año, período 1985 a 2023). ET/P: evapotranspiración real sobre lluvia; rendimiento: (escorrentía + flujo base)/lluvia; pérdida profunda: infiltración profunda/lluvia.

Cuenca	Lluvia	PET	ET real	ET/P	Rendimiento	Pérdida prof.
Río Aracataca	1 831	1 251	832	0.45	0.25	0.30
Río Frío y Río Sevilla	1 291	1 260	600	0.47	0.52	0.02
Río Fundación	1 407	1 267	677	0.48	0.42	0.10

3.3. Resumen de la simulación

El modelo se ejecutó para las 54 subcuencas, generando series diarias de 19 variables hidrológicas durante el período completo (788 940 registros). El primer año se descartó como período de calentamiento, necesario para que la humedad del suelo y el almacenamiento subterráneo alcancen un estado independiente de los valores iniciales. El período útil comprende 39 años (1985 a 2023) con 398 832 registros para los 28 COMIDs estratégicos.

La Tabla 3 resume los caudales simulados por cuenca. El caudal medio es el promedio de todos los valores diarios de los COMIDs estratégicos de la cuenca y los caudales mínimo y máximo son los extremos registrados en cualquier subcuenca y día del período útil. Como los caudales simulados son enrutados (cada COMID acumula lo que llega de aguas arriba), estos promedios dependen de la posición en la red de los COMIDs seleccionados y no representan el caudal de la cuenca en un punto.

Tabla 3: Resumen de caudales simulados por cuenca para los COMIDs estratégicos (período 1985 a 2023).

Cuenca	COMIDs	Q medio (m ³ /s)	Q mín (m ³ /s)	Q máx (m ³ /s)
Río Aracataca	3	22.02	0.212	155.0
Río Frío y Río Sevilla	13	5.60	0.009	89.9
Río Fundación	12	18.70	0.005	225.2

En Aracataca los tres COMIDs estratégicos se ubican en los tramos medio y bajo de la cuenca, donde el caudal enrutado ya acumula el aporte de las subcuencas de aguas arriba, mientras que en Frío-Sevilla la mayoría de los 13 COMIDs estratégicos son subcuencas de cabecera de área pequeña; el contraste entre sus caudales medios (22.0 frente a 5.6 m³/s) es consistente con esa diferencia de posición. Los mínimos cercanos a cero en Frío-Sevilla y Fundación indican que algunas subcuencas pequeñas experimentan estiajes severos, situación relevante para la planificación del uso del agua en las plantaciones. El rango de varios órdenes de magnitud entre mínimos y máximos refleja un régimen con alta variabilidad temporal, propio de cuencas tropicales con estacionalidad marcada.

3.4. Desempeño frente a las estaciones del IDEAM

La Tabla 4 presenta el desempeño del modelo por estación en calibración y validación, con el número de días medidos que entran en cada métrica. Entran 7 estaciones. El COMID 300079900 cuenta con dos (Fundación y Puerto Rico Hacienda) y en ese caso la serie simulada, que es el caudal de salida del COMID, se compara con cada estación por separado; Canal Florida comparte el COMID 300051300 con Puente Sevilla, excluida de la calibración.

Tabla 4: Desempeño del modelo por estación en calibración y validación, calculado sólo con días medidos por el IDEAM. N: días con dato; KGE: Kling-Gupta Efficiency compuesto; NSE: Nash-Sutcliffe; PBIAS: sesgo porcentual (positivo cuando el modelo sobreestima).

Estación	Cuenca	Calibración				Validación			
		N	KGE	NSE	PBIAS	N	KGE	NSE	PBIAS
El Trébol	Aracataca	9 269	0.42	0.11	-23.7 %	3 607	0.34	-0.09	-19.6 %
Ganadería Caribe	Aracataca	9 305	0.65	0.23	14.7 %	3 988	0.53	0.29	16.0 %
Canal Florida	Frío-Sevilla	8 079	0.37	-0.64	57.6 %	3 463	0.16	-1.46	55.4 %
Río Frío	Frío-Sevilla	8 247	0.52	0.22	-10.6 %	3 535	0.54	0.32	-17.2 %
Santa Rosalía	Frío-Sevilla	9 278	0.45	0.12	-7.0 %	3 977	0.20	0.43	24.0 %
Fundación	Fundación	8 086	0.51	0.27	4.5 %	3 466	0.59	0.15	12.4 %
Puerto Rico Hacienda	Fundación	4 232	0.61	0.27	7.1 %	1 815	0.42	0.23	14.6 %

El KGE compuesto de calibración por estación va de 0.37 a 0.65. La estación con peor desempeño es Canal Florida (sesgo de 58 % en calibración y 55 % en validación), situada aguas abajo de las captaciones del río Sevilla: mide un caudal ya derivado, que un modelo de caudal natural sobreestima de forma sistemática. El Trébol presenta el sesgo negativo mayor (-24 % en calibración), es decir, el modelo subestima el caudal del río Tucurín. En Fundación, Ganadería Caribe, Puerto Rico Hacienda y Río Frío los sesgos son menores y el KGE compuesto se mantiene o mejora en validación.

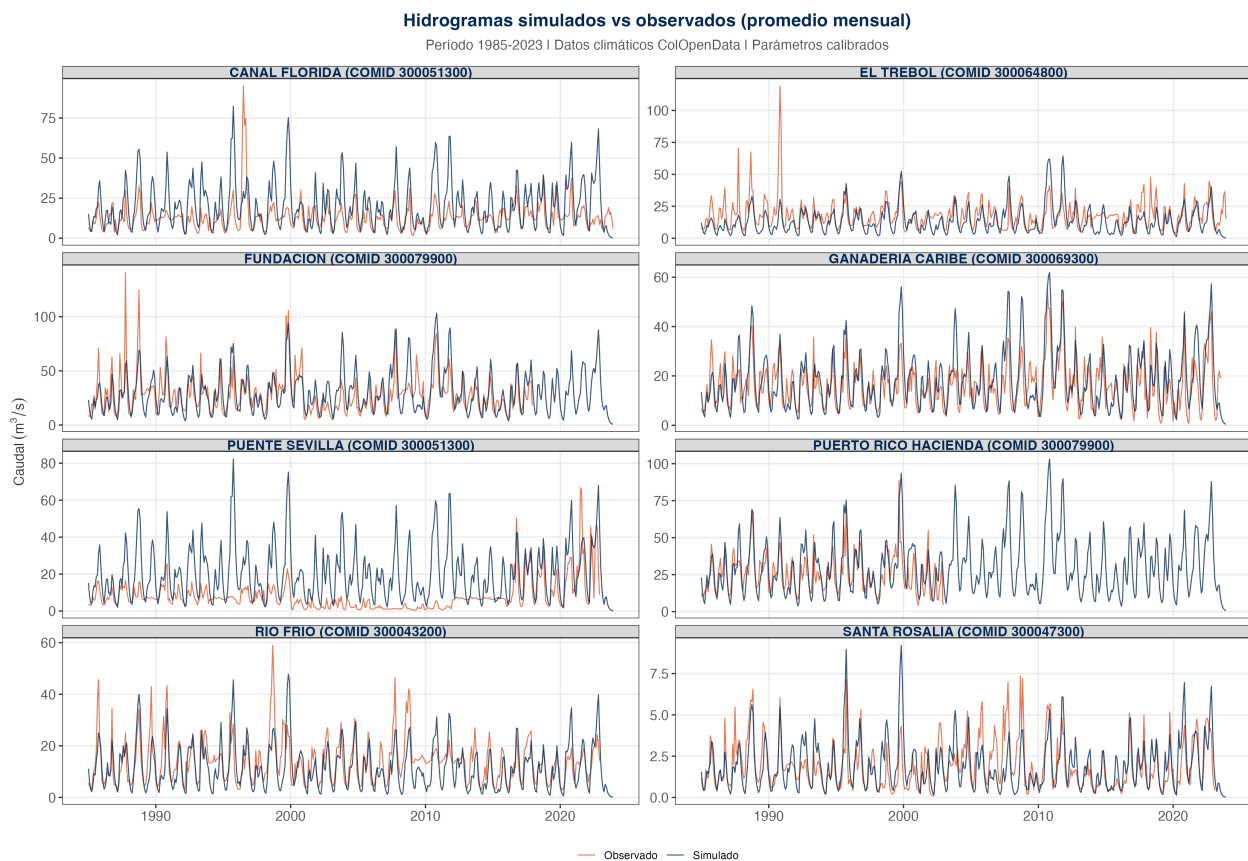


Figura 2: Hidrogramas simulados (azul) y observados (naranja) a escala mensual en las estaciones hidrométricas de las cuencas de estudio, período 1985 a 2023. La serie observada de la figura incluye los días completados para cerrar vacíos; las métricas de la Tabla 4 usan sólo días medidos.

Los hidrogramas de la Figura 2 muestran que el modelo reproduce la estacionalidad y la magnitud general de los caudales en la mayoría de las estaciones, con buena correspondencia en la fase de las crecidas y en los caudales base. Las diferencias más visibles son la sobreestimación sistemática en Canal Florida y Puente Sevilla, coherente con la derivación aguas arriba de ambas estaciones, y la subestimación de algunos picos, comportamiento esperable de una calibración con KGE compuesto, que equilibra la representación de caudales altos y bajos.

3.4.1. Incertidumbre que se propaga a las actividades siguientes

Los sesgos de la Tabla 4, entre -24 % y 58 % según la estación y el tramo, son la medida de la incertidumbre de la oferta hídrica simulada. La oferta de las actividades 2.3.1 a 2.3.3 y los balances de la actividad 3.2 se construyen sobre estas series y heredan esa tolerancia: un índice de uso o un déficit calculado con ellas debe leerse con un margen del orden de esos sesgos y no con la precisión con que se imprimen las cifras.

3.5. Indicadores hidrológicos

Los indicadores resumen en pocos valores el comportamiento de casi cuatro décadas de caudales y permiten comparar las subcuencas entre sí. El Q_{90} es el caudal igualado o excedido el 90 % del tiempo, indicador del caudal de época seca y valor de referencia habitual para estimar la oferta disponible; el Q_{10} se asocia a condiciones de crecida. El cociente Q_{90}/Q_{50} cuantifica la regulación natural: valores cercanos a uno indican un régimen uniforme y valores bajos, un contraste pronunciado entre épocas húmedas y secas. El CV mide la dispersión relativa de los caudales diarios respecto a la media.

La Tabla 5 presenta estos indicadores para los 6 COMIDs con estación hidrométrica, que son los puntos de referencia para la validación.

Tabla 5: Indicadores hidrológicos de los COMIDs con estación hidrométrica (período 1985 a 2023). Caudales en m^3/s .

COMID	Estación	Q medio	Q_{90}	Q_{10}	Q_{90}/Q_{50}	CV
300069300	Ganadería Caribe	18.3	5.16	35.1	0.33	0.67
300064800	El Trébol	13.6	3.44	26.6	0.31	0.78
300051300	Canal Florida y Puente Sevilla	20.2	4.33	40.8	0.26	0.74
300043200	Río Frío	11.8	2.11	23.8	0.21	0.76
300047300	Santa Rosalía	1.9	0.37	3.9	0.24	0.80
300079900	Fundación y Puerto Rico Hacienda	30.0	8.54	57.0	0.33	0.66

Los COMIDs con estación de Aracataca y Fundación presentan valores de Q_{90}/Q_{50} entre 0.31 y 0.33: en época seca mantienen un flujo base cercano a un tercio de la mediana. Los de Frío-Sevilla quedan entre 0.21 y 0.26, con un caudal de estiaje cercano a la cuarta parte de la mediana o menor, lo que implica mayor vulnerabilidad hídrica en los períodos secos. Como los parámetros son uniformes dentro de cada cuenca, las diferencias entre subcuencas de una misma cuenca reflejan el forzante climático interpolado y la posición en la red, no propiedades hidrogeológicas calibradas por subcuenca. Desde la perspectiva del cultivo, las subcuencas de Frío-Sevilla requieren una gestión hídrica más cuidadosa: la disponibilidad en los meses de estiaje es una fracción pequeña del promedio anual.

3.6. Curvas de duración de caudales

La curva de duración de caudales (FDC) sintetiza toda la serie en una sola curva: el eje horizontal es la probabilidad de excedencia (porcentaje del tiempo en que un caudal es igualado o superado) y el vertical el caudal correspondiente. El extremo izquierdo recoge las crecidas y el derecho el estiaje; una curva empinada denota alta variabilidad y una tendida, un régimen más regulado. La Figura 3 presenta las FDC de los 28 COMIDs estratégicos en escala logarítmica, por cuenca.

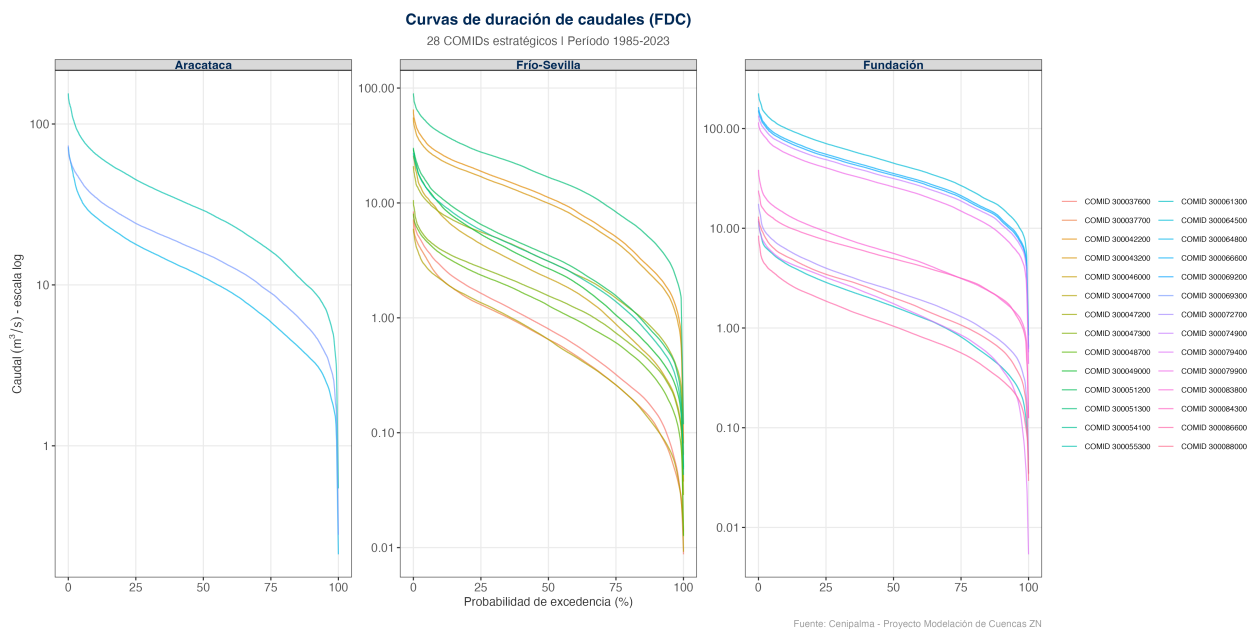


Figura 3: Curvas de duración de caudales de los 28 COMIDs estratégicos, por cuenca. Escala logarítmica en el eje vertical. Período 1985 a 2023.

En Fundación la dispersión vertical entre curvas es la mayor: coexisten subcuencas de cabecera con caudal medio inferior a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y tramos acumuladores del cauce principal con caudal medio superior a $53 \text{ m}^3/\text{s}$, de modo que la disponibilidad dentro de la cuenca varía sustancialmente con la posición en la red. En Aracataca las tres curvas se agrupan en la zona de caudales altos y se separan en el tramo de altas probabilidades de excedencia, con caudales medios entre 13.6 y $34.2 \text{ m}^3/\text{s}$. En Frío-Sevilla las FDC cubren desde subcuencas con caudal medio cercano a $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el COMID de cierre con $20.2 \text{ m}^3/\text{s}$, y varias curvas caen con pendiente pronunciada en el tramo de altas probabilidades de excedencia, consistente con los bajos valores de Q_{90}/Q_{50} de la Tabla 5. Para la gestión del recurso, las FDC permiten fijar el caudal disponible con un nivel de confiabilidad dado; el Q_{75} , por ejemplo, se usa como referencia de oferta en año seco para dimensionar captaciones.

3.7. Régimen hidrológico mensual

El régimen mensual describe cómo se distribuyen los caudales a lo largo del año, información esencial porque la palma de aceite mantiene requerimientos hídricos relativamente constantes y el desbalance potencial se concentra en los meses de menor oferta. Para cada COMID se calculó el caudal medio de cada mes sobre los 39 años del período útil; la Figura 4 lo presenta como mapa de calor, con una escala de color en raíz cuadrada que facilita distinguir los tonos en el rango de caudales bajos.

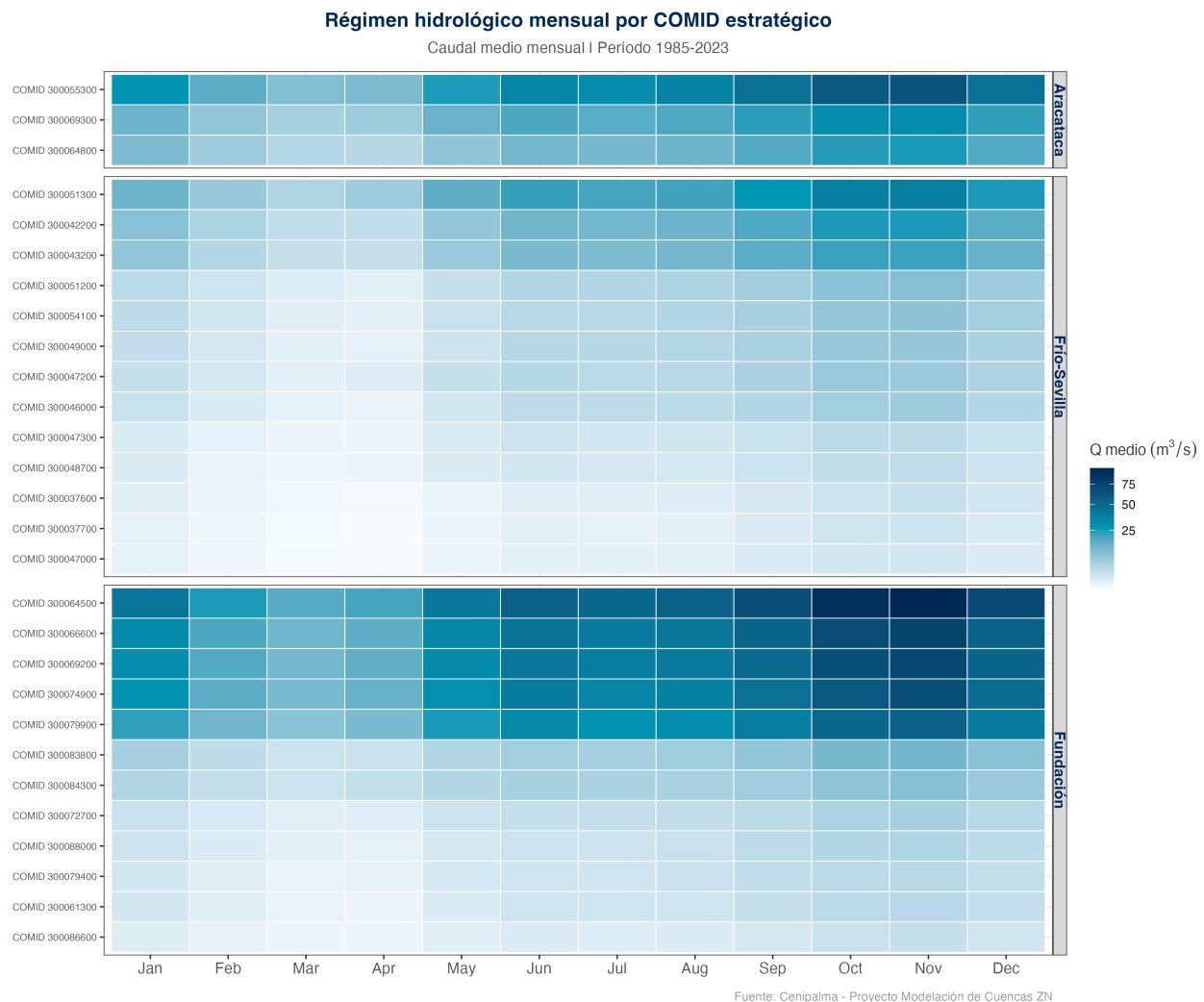


Figura 4: Régimen hidrológico mensual por COMID estratégico. El color representa el caudal medio mensual (m^3/s) en escala raíz cuadrada. Los COMIDs están agrupados por cuenca y ordenados por caudal medio descendente. Período 1985 a 2023.

Se observa el patrón bimodal característico del Caribe colombiano: un período principal de caudales altos entre septiembre y noviembre, uno secundario entre mayo y junio, un veranillo a mitad de año y un estiaje prolongado entre diciembre y marzo, consistente con el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical y con los registros del IDEAM para la Zona Norte del Magdalena. Dentro de cada cuenca el patrón estacional es homogéneo entre subcuencas (todas las filas de un panel comparten la distribución temporal de colores y sólo cambian de intensidad), lo que es esperable: la estacionalidad la impone la precipitación, uniforme a la escala de estas cuencas, y las diferencias de magnitud reflejan el área acumulada y el forzante local. En Fundación, los COMIDs del cauce principal muestran el contraste más marcado entre el mes pico (octubre y noviembre) y el estiaje (febrero a abril). Los meses de enero a abril concentran los caudales más bajos en las tres cuencas y son el período crítico para la planificación del riego; las actividades 2.3.x cuantifican en qué COMIDs la demanda supera la oferta en esos meses.

4. Conclusiones

- Se ejecutó el modelo HydroBID con parámetros calibrados por Evolución Diferencial (KGE compuesto) y validados sólo con días medidos por el IDEAM, generando series diarias de caudal para 54 subcuencas en 1984 a 2023 (788 940 registros).
- La partición física del balance es plausible: la evapotranspiración real representa entre 45 % y 48 % de la lluvia y el rendimiento hídrico entre 25 % y 52 %.
- El KGE compuesto por cuenca está entre 0.29 y 0.52 en calibración y entre 0.44 y 0.49 en validación. Los sesgos por estación, entre -24 % y 58 %, delimitan la incertidumbre con que deben leerse la oferta y los balances de las actividades siguientes; el mayor corresponde a Canal Florida, que mide caudal ya derivado.
- Se extrajeron las series de los 28 COMIDs estratégicos para el período útil 1985 a 2023 (398 832 registros), descartado el primer año como calentamiento.
- Los indicadores muestran un régimen bimodal con estacionalidad marcada (Q_{90}/Q_{50} entre 0.17 y 0.40) y variabilidad moderada a alta (CV entre 0.62 y 1.10), con los caudales más bajos entre enero y abril y los más altos entre septiembre y noviembre.
- Las series y los indicadores son la base de las actividades de oferta y demanda hídrica y de la evaluación de las prácticas agrícolas sobre los caudales.