
Documento Técnico

Actividad 2.3.4

Evaluación de la disponibilidad hídrica actual en las cuencas de estudio

Zona Palmera Norte — Departamento del Magdalena

Proyecto C-INV-AG-007

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

Autores

Andrea Zabala-Quimbayo • Carlos Ricardo Bojacá Aldana
Área de Geomática

Cenipalma

Abril 2026

1. Presentación

La disponibilidad de agua es uno de los factores más determinantes para la productividad de la palma de aceite. En la Zona Palmera Norte, en el departamento del Magdalena, donde las cuencas de los ríos Sevilla-Frío, Aracataca-Tucurinca y Fundación abastecen a miles de hectáreas de cultivo, comprender cuánta agua hay, cuándo está disponible y dónde hace falta es fundamental para la toma de decisiones de manejo en campo.

Este documento técnico sintetiza los principales hallazgos de la evaluación de disponibilidad hídrica realizada en el marco del proyecto **C-INV-AG-007 — Modelación hidrológica de cuencas incorporando las mejores prácticas agrícolas en el cultivo de palma de aceite**, desarrollado por el Área de Geomática de Cenipalma.

Este análisis se basa en 39 años de información hidrológica simulada (1985–2023) mediante el modelo HydroBID, desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo y RTI International como herramienta de gestión del recurso hídrico en América Latina y el Caribe (RTI International, 2023; Moreda et al., 2014).

El estudio se realizó en tres etapas complementarias: primero se cuantificó y mapeó la oferta hídrica en 28 puntos estratégicos de monitoreo distribuidos en las tres cuencas principales (actividad 2.3.1); luego se caracterizó cómo varían los caudales a lo largo del año y entre años, con especial atención al fenómeno ENOS – El Niño Oscilación del Sur (actividad 2.3.2); y finalmente se cruzó la oferta con la demanda para identificar las zonas y períodos de mayor vulnerabilidad hídrica (actividad 2.3.3).

Este documento está dirigido a técnicos, palmicultores y profesionales del sector interesados en comprender el estado actual del recurso hídrico en la región. El texto prioriza la claridad sobre la jerga técnica, y al final se incluye un glosario con los términos especializados utilizados. La investigación se enmarca en los lineamientos del Estudio Nacional del Agua (ENA) del IDEAM (2022), que provee el marco metodológico de referencia para la evaluación de la presión sobre los recursos hídricos en Colombia.

2. Área de estudio y metodología general

2.1. Ubicación geográfica

El estudio se centra en las cuencas de la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG). Las tres cuencas principales son Frío-Sevilla (1.741 km²), Aracataca-Tucurinca (1.506 km²) y Fundación (1.413 km²). Estas cuencas nacen en las estribaciones de la Sierra Nevada, donde las precipitaciones orográficas (hacia la montaña) son significativos en volúmenes acumulados y descienden hacia la planicie aluvial del Magdalena, donde se concentran las plantaciones de palma de aceite y otros cultivos agrícolas, principalmente banano.

La región presenta un régimen climático tropical con influencia del Caribe, caracterizado por un patrón bimodal de lluvias que ha sido ampliamente documentado en la literatura hidrológica colombiana (Poveda et al., 2001; Poveda et al., 2011). La Sierra Nevada de Santa Marta, como macizo montañoso aislado, genera gradientes altitudinales pronunciados que producen una marcada heterogeneidad espacial en la precipitación y, en consecuencia, en la generación de escorrentía (Rodríguez-Eraso et al., 2010).

2.2. Puntos estratégicos de monitoreo

Se seleccionaron 28 subcuencas estratégicas, identificadas mediante códigos COMID (*Common Identifier*, por sus siglas en inglés), un sistema de identificación utilizado por el modelo HydroBID para subdividir las cuencas en unidades hidrológicas. Estos puntos representan sitios clave donde confluyen tributarios importantes, se localizan bocatomas de acueductos o distritos de riego, o se requiere monitoreo para la gestión del recurso. Están distribuidos así: 13 en Frío-Sevilla, 3 en Aracataca-Tucurinca y 12 en Fundación.

2.3. Modelo hidrológico

Los caudales utilizados en este análisis provienen de simulaciones realizadas con el modelo HydroBID, una plataforma de modelación hidrológica desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). HydroBID emplea el método GWLF (*Generalized Watershed Loading Functions*, por sus siglas en inglés) como motor de cálculo y utiliza la ecuación de Hamon para estimar la evapotranspiración potencial. El modelo fue

calibrado y validado con registros de estaciones limnimétricas del IDEAM en la región, empleando optimización por Evolución Diferencial y el criterio KGE (eficiencia de Kling-Gupta) como función objetivo. Los detalles de la calibración se documentan en los reportes de las actividades 2.1.3 y 2.1.4 del proyecto.

2.4. Conceptos clave

Para facilitar la lectura de este documento, se presentan algunos conceptos fundamentales:

Oferta hídrica bruta: es el volumen total de agua que genera una cuenca, medido como el caudal promedio del período 1985–2023, expresado en hectómetros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$). Un hectómetro cúbico equivale a un millón de metros cúbicos.

Caudal ecológico: es la cantidad mínima de agua que debe permanecer en el río para mantener los ecosistemas acuáticos. Siguiendo los lineamientos de CORPAMAG, se reserva el 35 % del caudal medio histórico. Este porcentaje se encuentra dentro del rango recomendado por la literatura internacional para ríos tropicales, que sitúa los requerimientos de caudal ambiental entre el 25 % y el 46 % del caudal medio anual para condiciones ecológicas aceptables (Pastor et al., 2014; Salinas-Rodríguez et al., 2018).

Oferta hídrica neta: es el agua efectivamente disponible para uso productivo después de descontar el caudal ecológico. En este estudio corresponde al 65 % de la oferta bruta.

Índice de Uso de Agua (IUA): es la relación porcentual entre la demanda total de agua y la oferta disponible, definido por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua (ENA 2022). Valores por encima del 50 % se consideran presión "Alta" y por encima del 100 % presión "Muy Alta".

3. ¿Cuánta agua hay y dónde está?

El primer paso para evaluar la disponibilidad hídrica es cuantificar cuánta agua generan las cuencas y cómo se distribuye en el territorio. Los resultados revelan una marcada heterogeneidad espacial, tanto entre cuencas como dentro de cada una.

3.1. Distribución espacial de la oferta hídrica

La generación de agua varía enormemente a lo largo de las cuencas. Para visualizar esta heterogeneidad, la Figura 1 presenta el módulo de esorrentía, es decir, la cantidad de agua generada por unidad de área, en cada uno de los 28 puntos estratégicos. Este indicador, expresado en milímetros por año, permite comparar subcuencas de tamaños diferentes en igualdad de condiciones y revela dónde se produce el agua que luego alimenta los ríos principales. En las cabeceras, donde las pendientes son pronunciadas y la precipitación orográfica es elevada, se producen los mayores volúmenes por unidad de área. En la zona baja, donde se ubican las plantaciones de palma de aceite, la generación local es menor pero se beneficia del aporte acumulado de los tributarios de montaña. Esta variabilidad espacial es consistente con lo reportado por estudios sobre la suficiencia hídrica para cultivos en la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (Valencia et al., 2022).

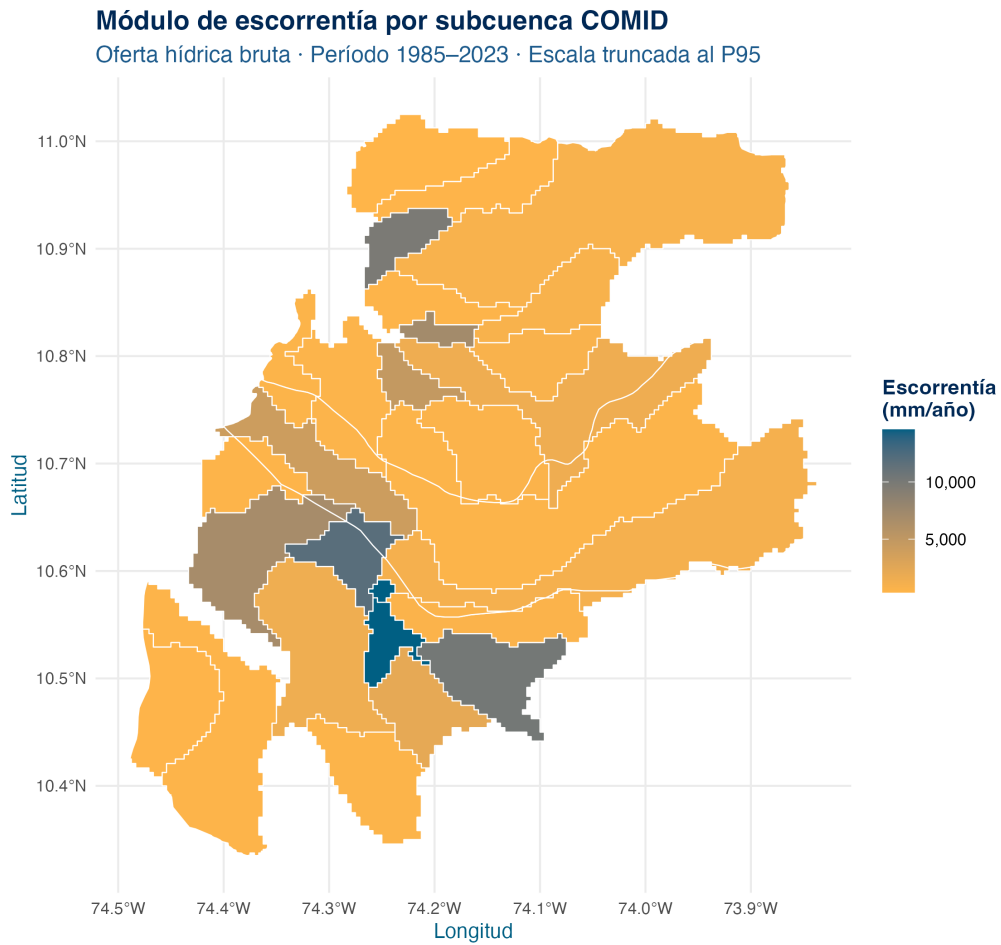


Figura 1. Distribución espacial del módulo de escorrentía (mm/año) para los 28 puntos estratégicos. Los valores más altos se concentran en las cabeceras de las cuencas. Período 1985–2023.

3.2. Comparación entre cuencas

La diferencia entre cuencas es notable, como se sintetiza en la Tabla 1, Fundación genera un volumen bruto de 7.084 hm³/año, más de tres veces el de Aracataca-Tucurínca (2.077 hm³/año) o Frío-Sevilla (2.087 hm³/año), pese a tener áreas de drenaje comparables. Esta asimetría se explica por la mayor precipitación en las cabeceras del río Fundación, que reciben aportes pluviales de la vertiente noroccidental de la Sierra Nevada.

Tabla 1. Resumen de oferta hídrica por cuenca. El volumen neto corresponde al 65% del bruto, tras descontar el caudal ecológico.

Cuenca	Puntos	Área (km ²)	Vol. bruto (hm ³ /año)	Vol. neto (hm ³ /año)
Aracataca	3	1.506	2.077	1.350
Frío-Sevilla	13	1.741	2.087	1.357
Fundación	12	1.413	7.084	4.604

Tras descontar el 35 % de caudal ecológico, la oferta neta mantiene la misma jerarquía. La reserva ecológica representa volúmenes significativos: solo en Fundación, el caudal ecológico equivale a 2.480 hm³/año, lo que subraya el compromiso entre la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y las demandas productivas. La Figura 2 visualiza esta composición.

Composición de la oferta hídrica por cuenca

Oferta bruta = caudal ecológico (35%) + oferta neta

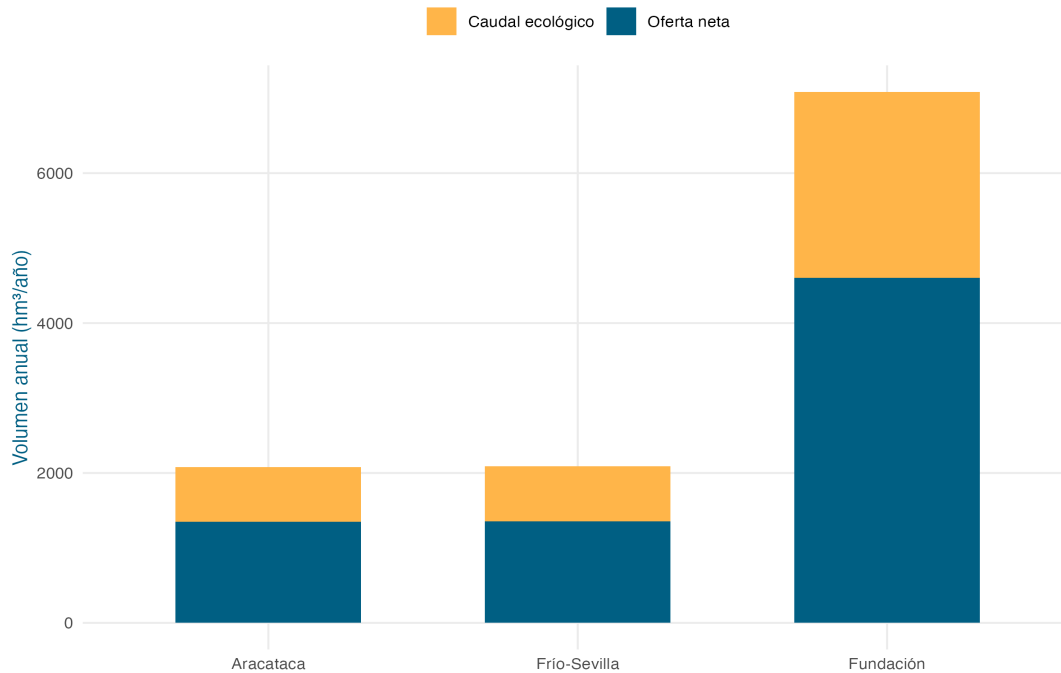


Figura 2. Composición de la oferta hídrica anual por cuenca: oferta neta disponible (65%) y caudal ecológico reservado (35%).

Mensaje clave: La disponibilidad de agua varía enormemente entre cuencas y dentro de cada cuenca. Fundación dispone de tres veces más agua que Frío-Sevilla o Aracataca, pero todas deben reservar el 35% para el sostenimiento ecológico de los ríos.

3.3. ¿Cuánta agua hay en los períodos secos?

El promedio anual no cuenta toda la historia. Las curvas de duración de caudal (Figura 3) permiten evaluar qué tan confiable es el suministro: una curva plana indica que el río mantiene un caudal relativamente estable, mientras que una curva empinada señala que el caudal cae drásticamente en épocas secas.

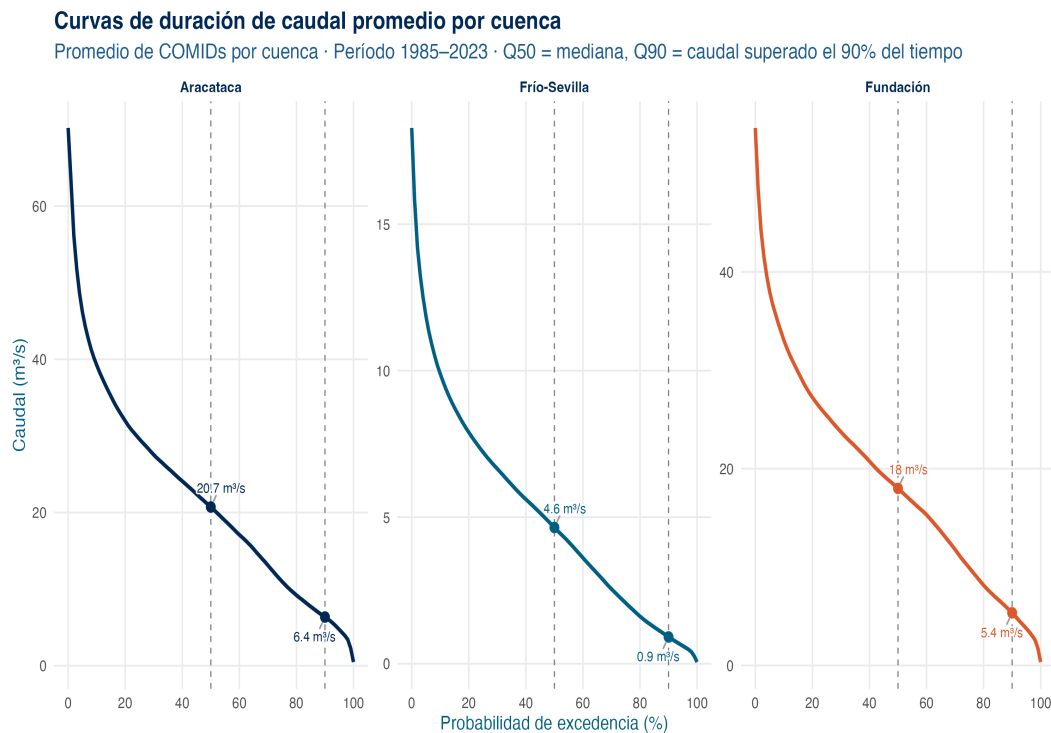


Figura 3. Curvas de duración de caudal por cuenca. La pendiente indica la regulación natural: curvas más planas significan mayor estabilidad del suministro. Período 1985–2023.

Mensaje clave: Frío-Sevilla es la cuenca con peor regulación natural. En períodos secos, su caudal disponible se reduce al 20% del valor mediano, lo que representa un riesgo significativo para el abastecimiento de las plantaciones.

Aracataca-Tucurínca y Fundación muestran una regulación natural moderada: sus caudales disponibles el 90% del tiempo (Q_{90}) son de 6,4 y 5,4 m^3/s respectivamente, aproximadamente el 30% de su caudal mediano. En contraste, **Frío-Sevilla presenta la peor regulación:** su Q_{90} es de apenas 0,9 m^3/s , solo el 20% de su mediano, lo que significa que durante el 10% del tiempo más seco, la disponibilidad se reduce drásticamente. Diseñar infraestructura de captación basándose en el caudal promedio de Frío-Sevilla resulta particularmente riesgoso.

4. ¿Cómo se comporta el agua a lo largo del año?

Además de saber cuánta agua hay en total, es crucial entender cuándo está disponible. El análisis temporal revela un patrón estacional marcado y una fuerte influencia del fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) en la variabilidad de un año a otro.

4.1. El régimen bimodal: dos picos y un estiaje crítico

Las tres cuencas presentan un régimen bimodal típico del Caribe colombiano, ampliamente documentado en la literatura hidrológica regional (Poveda et al., 2001; Poveda et al., 2011): dos períodos de aguas altas (mayo-junio y septiembre-noviembre) separados por un "veranillo" en julio-agosto, y un estiaje principal entre diciembre y marzo.

Los contrastes estacionales son considerables, como se aprecia en la Figura 4. Frío-Sevilla exhibe la mayor irregularidad: su caudal en octubre ($9,2 \text{ m}^3/\text{s}$) se reduce a apenas $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo, un cociente de irregularidad de 8,7. Esto significa que en los meses secos, el caudal equivale a solo el 11% del valor máximo. Aracataca y Fundación presentan irregularidades menores (cociente de 5,6 en ambos casos), pero igualmente significativas para la planificación del riego.

Régimen estacional de caudales (1985–2023)

Banda: percentiles 25–75 · Línea continua: media · Línea punteada: mediana

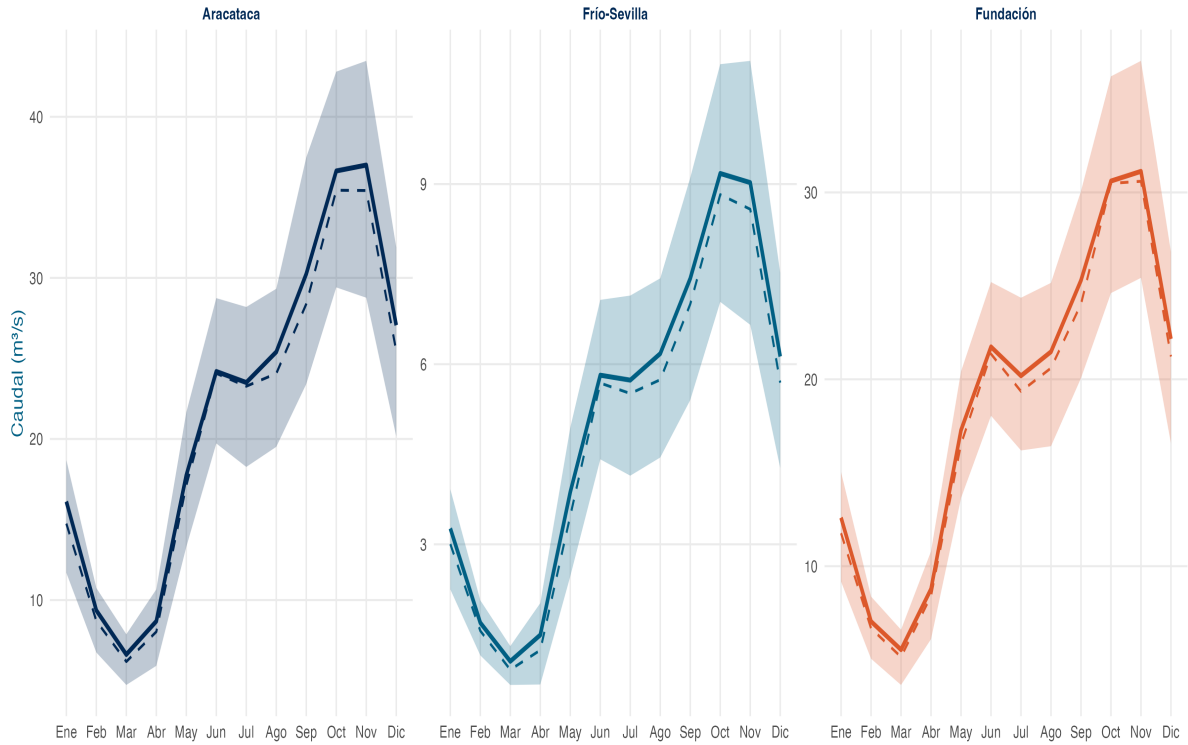


Figura 4. Régimen estacional de caudales por cuenca. La banda sombreada muestra la variabilidad entre años. El estiaje principal (diciembre-marzo) es consistente en las tres cuencas. Período 1985–2023.

Marzo es sistemáticamente el mes más crítico: como lo confirma la Figura 5, menos del 10% de los días de marzo registran caudales por encima del promedio anual, lo que indica que prácticamente todo el mes transcurre bajo condiciones de escasez.

Patrón estacional: frecuencia de caudales sobre la media

Porcentaje de días por mes con caudal superior al promedio del COMID

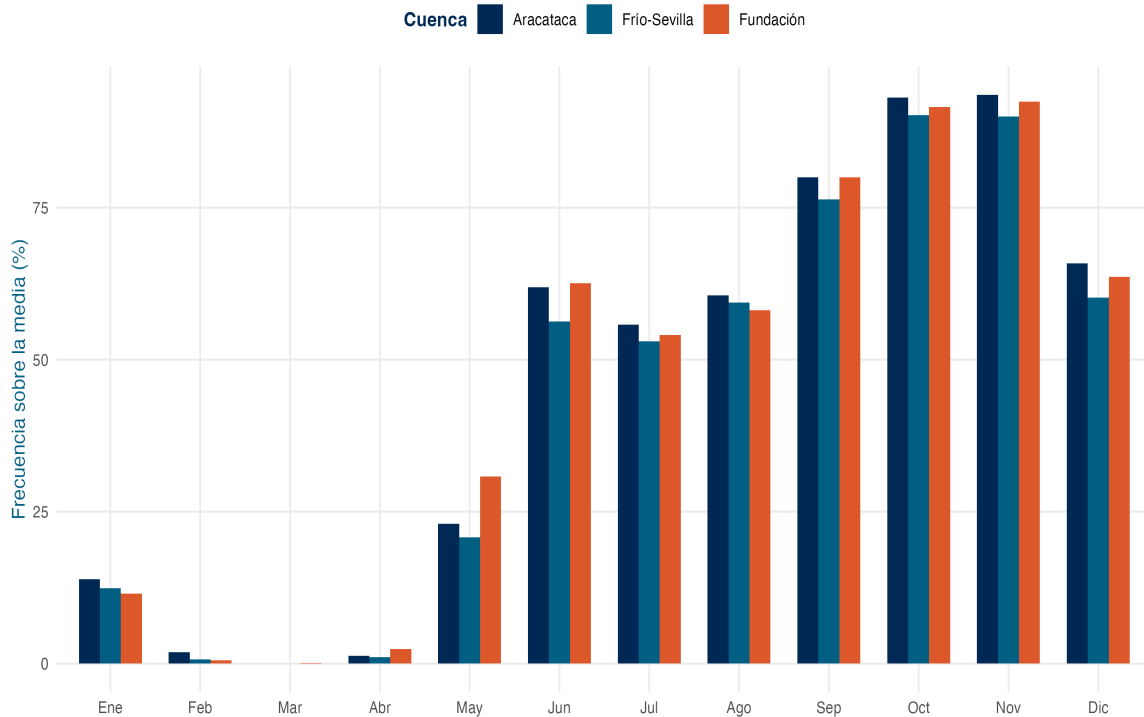


Figura 5. Frecuencia de días con caudal superior al promedio por mes. Marzo presenta la frecuencia más baja, confirmando su carácter como el mes más seco del año.

Mensaje clave: Marzo es consistentemente el mes más seco en las tres cuencas. En Frío-Sevilla, el caudal de marzo equivale a solo el 11% del máximo anual.

4.2. El efecto del ENOS: El Niño seca, La Niña inunda

La variabilidad de un año a otro está dominada por el fenómeno ENOS, que modula los caudales de manera sustancial. En el período 1985–2023 se identificaron 8 años El Niño, 12 años La Niña y 19 años neutros. El efecto sobre los caudales es consistente con lo reportado por Poveda et al. (2001), quienes demostraron que los efectos del ENOS sobre los caudales son incluso más fuertes que sobre la precipitación, debido a los efectos concomitantes sobre la humedad del suelo y la evapotranspiración.

Las cifras son elocuentes (Figuras 6 y 7): en años La Niña, los caudales superan en un 63–78% los valores normales, mientras que en años El Niño se reducen entre un 30% y un 77%. El año 2023, clasificado como El Niño, fue el más seco del período en las tres cuencas, con reducciones de hasta el 77% en Frío-Sevilla. En el extremo opuesto, La Niña de 2010–2011 incrementó los caudales hasta un 145% por encima del promedio.

Estudios recientes a escala diaria en embalses colombianos (Rincón-Soto & Poveda, 2025) confirman esta modulación diferenciada del ENOS sobre las señales hidrológicas.

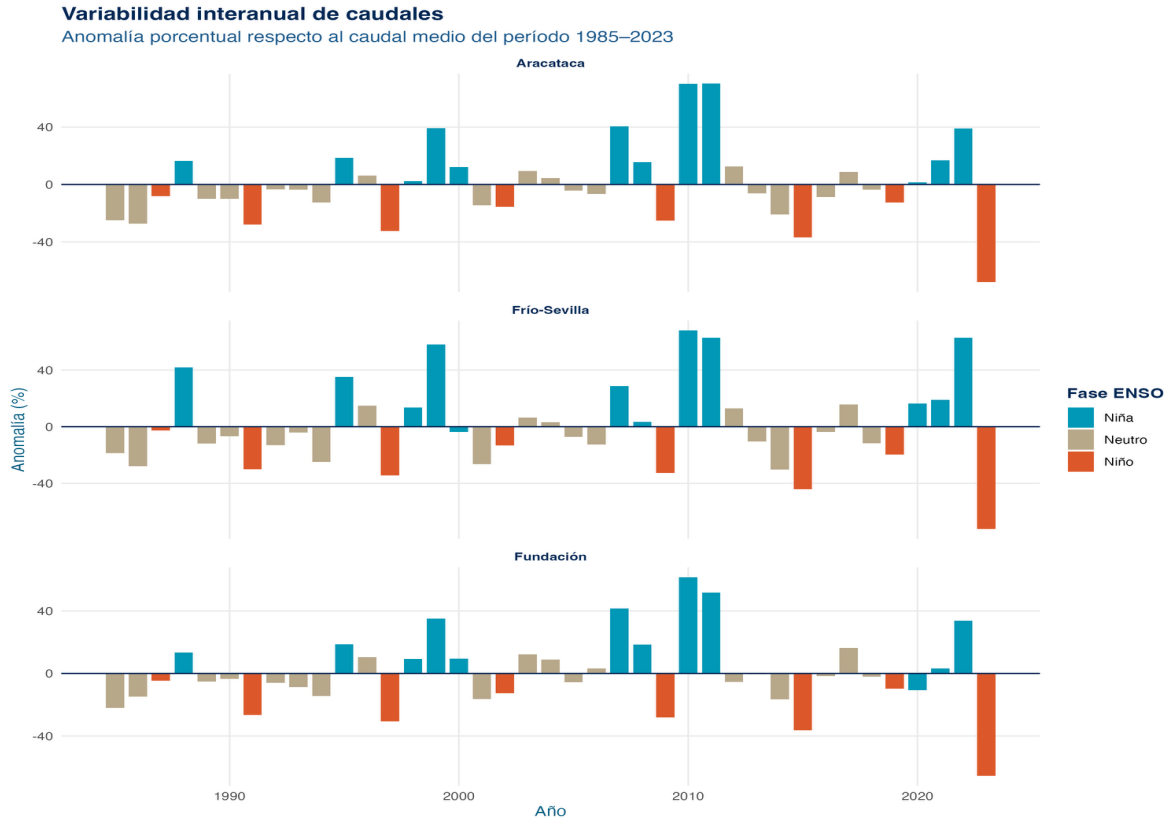


Figura 6. Anomalías porcentuales del caudal anual, clasificadas por fase ENOS. Los años El Niño (naranja) se asocian con reducciones severas, y los años La Niña (azul) con excedentes. Período 1985–2023.

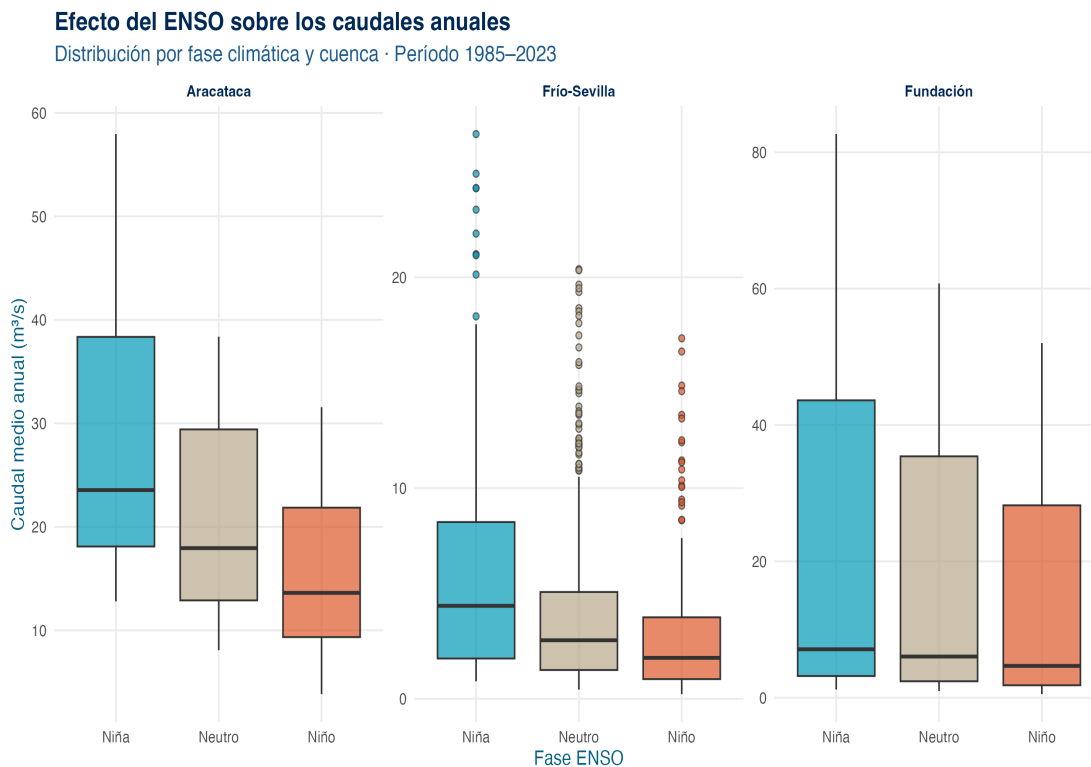


Figura 7. Distribución de caudales por fase ENOS y cuenca. La separación entre las cajas de Niña y Niño confirma la fuerte modulación climática.

Mensaje clave: El ENOS es el principal modulador de la variabilidad interanual. En años El Niño, los caudales pueden reducirse hasta un 77%, mientras que en años La Niña pueden duplicarse. La planificación del riego debe considerar este rango de variabilidad.

4.3. Tendencias de largo plazo

Un hallazgo relevante del análisis es que **27 de los 28 puntos de monitoreo no muestran tendencias significativas de cambio en los caudales durante los 39 años analizados** (test de Mann-Kendall, $\alpha = 0,05$). La única excepción es un punto en Fundación con una leve tendencia de aumento ($\tau = 0,23$, $p = 0,042$), posiblemente asociada a cambios locales en el uso del suelo.

Este resultado, sintetizado en la Figura 8, es consistente con análisis de tendencias en ríos sudamericanos que concluyen que la variabilidad observada responde predominantemente a la oscilación climática natural (ENOS) y no a cambios direccionales de largo plazo en las ventanas de análisis evaluadas (Marengo, 1995; Hamed, 2008). Esto sugiere que las estadísticas del período 1985–2023 constituyen una base razonable para la planificación, siempre que se considere la variabilidad asociada al ENOS. No obstante,

tendencias climáticas de mayor escala temporal podrían manifestarse en horizontes más largos.

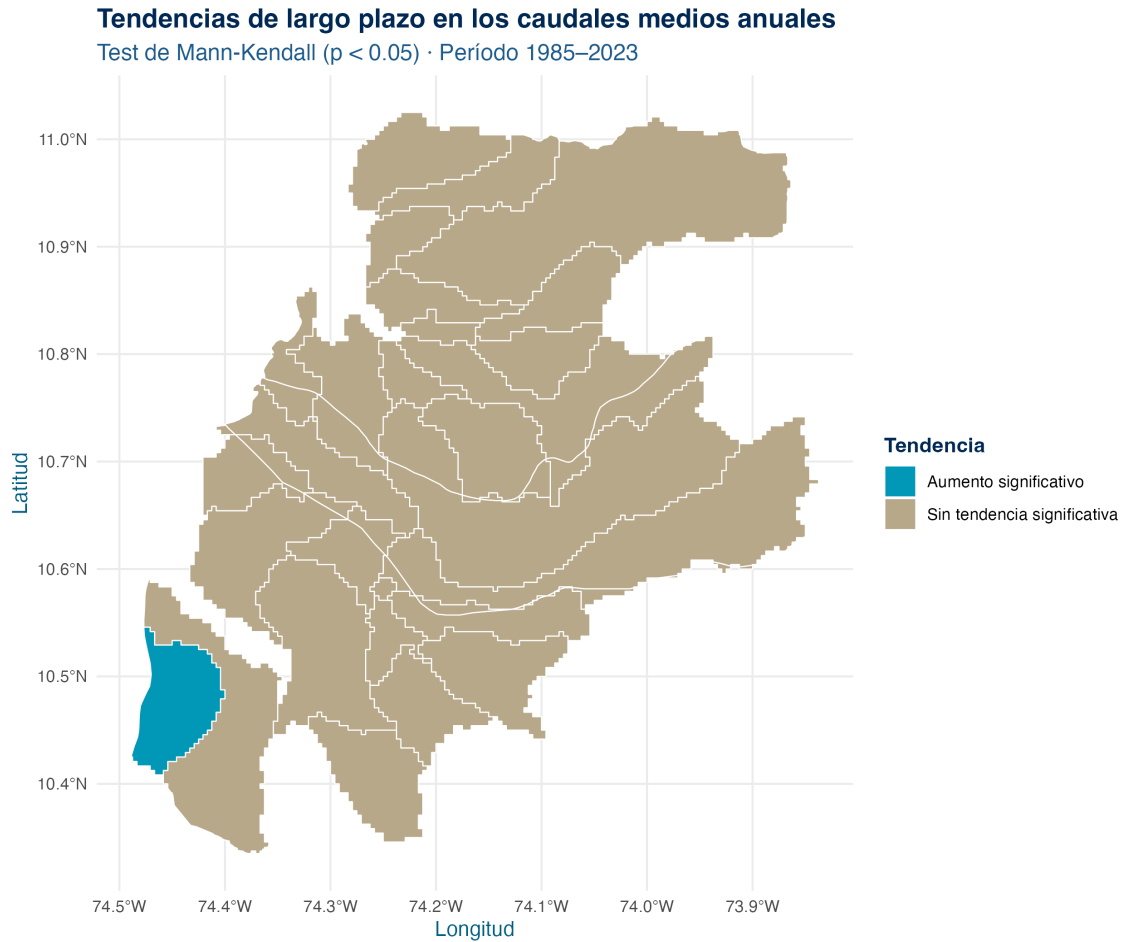


Figura 8. Tendencias de largo plazo en los caudales anuales (test de Mann-Kendall). Solo un punto en Fundación muestra tendencia significativa de aumento. Período 1985–2023.

5. ¿Dónde y cuándo el agua no alcanza?

La pregunta central para la gestión del recurso es si la oferta disponible es suficiente para cubrir la demanda. Al cruzar la oferta neta con las demandas sectoriales (doméstica, bananera, palmera y ecológica), estimadas en el objetivo 1 del proyecto a partir de las concesiones otorgadas por CORPAMAG, se obtiene un panorama que revela un déficit de carácter estructural.

5.1. Balance hídrico mensual

El balance mensual (oferta neta menos demanda) muestra un patrón estacional claro (Figura 9): superávit entre mayo y noviembre, y déficit entre diciembre y abril. Frío-Sevilla presenta la situación más desfavorable, con cuatro meses consecutivos de déficit (enero a abril), siendo marzo el más crítico. Aracataca-Tucurinca limita su déficit a dos meses (febrero-marzo), mientras que Fundación mantiene un balance apenas positivo en promedio, pero vulnerable a años secos.

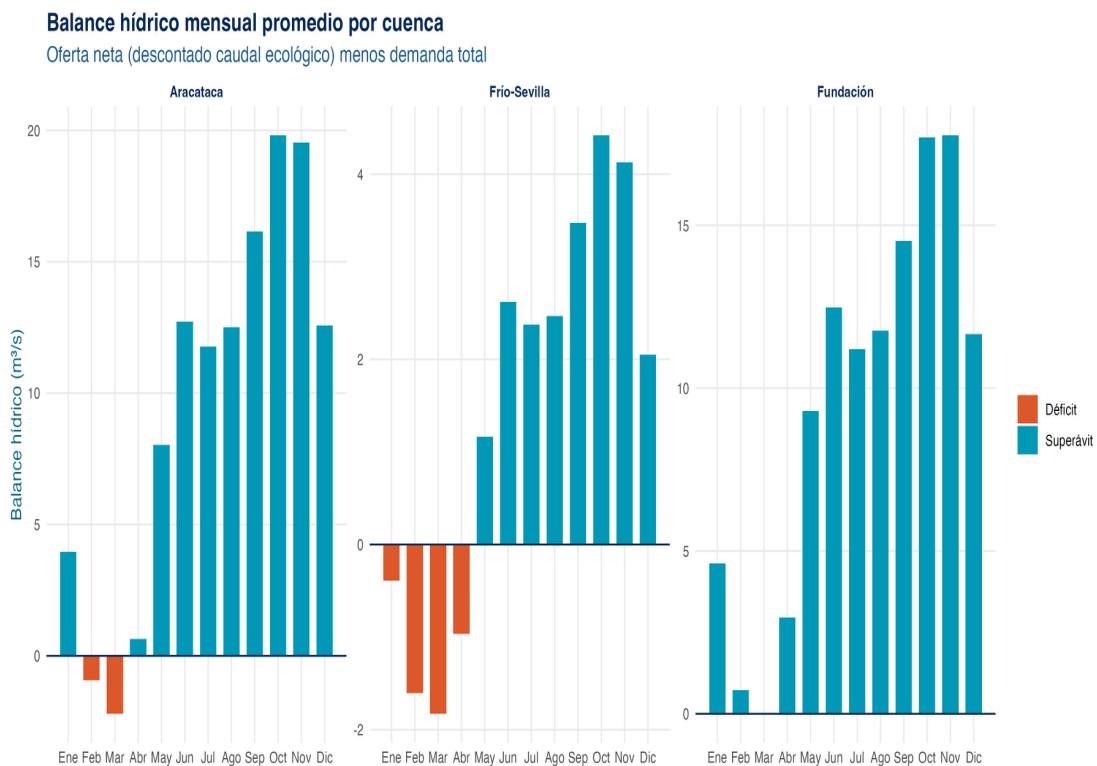


Figura 9. Balance hídrico mensual por cuenca. Las barras por debajo de cero indican déficit (la demanda supera la oferta neta). Frío-Sevilla presenta cuatro meses de déficit consecutivos.

5.2. Índice de Uso de Agua: la presión sobre el recurso

El Índice de Uso de Agua (IUA), definido por el IDEAM en el marco del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2022), expresa la demanda como porcentaje de la oferta. Cuando supera el 100%, significa que la demanda concesionada excede la oferta neta disponible. Los resultados, presentados en la Tabla 2, son contundentes:

Tabla 2. IUA promedio mensual (%) por cuenca. Valores superiores al 100% indican que la demanda supera la oferta neta. Valores superiores al 50% corresponden a presión "Alta" o superior según el IDEAM.

Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Aracataca	60	112	154	98	32	19	24	27	23	28	44	83
Frío-Sevilla	139	299	518	554	216	92	90	69	60	63	113	240
Fundación	146	298	458	321	86	43	55	61	50	65	110	219

En Frío-Sevilla, el IUA alcanza un 518% en marzo, lo que significa que la demanda quintuplica la oferta disponible. Incluso en los meses más húmedos (agosto-septiembre), el IUA se mantiene por encima del 50% (presión "Alta"). Fundación muestra un patrón similar con magnitudes ligeramente menores, mientras que Aracataca es la única cuenca que logra niveles de presión "Baja" durante los meses centrales del año. Estos niveles de presión son consistentes con los reportados por el IDEAM para subzonas hidrográficas del Caribe colombiano con alta concentración de demandas agrícolas (IDEAM, 2022).

Es importante señalar que valores de IUA superiores al 100% no implican necesariamente que se extraiga más agua de la disponible en un momento dado, ya que existen retornos, uso de aguas subterráneas y almacenamiento. Sin embargo, reflejan una **presión estructural sobre el recurso** que requiere gestión activa para garantizar la sostenibilidad.

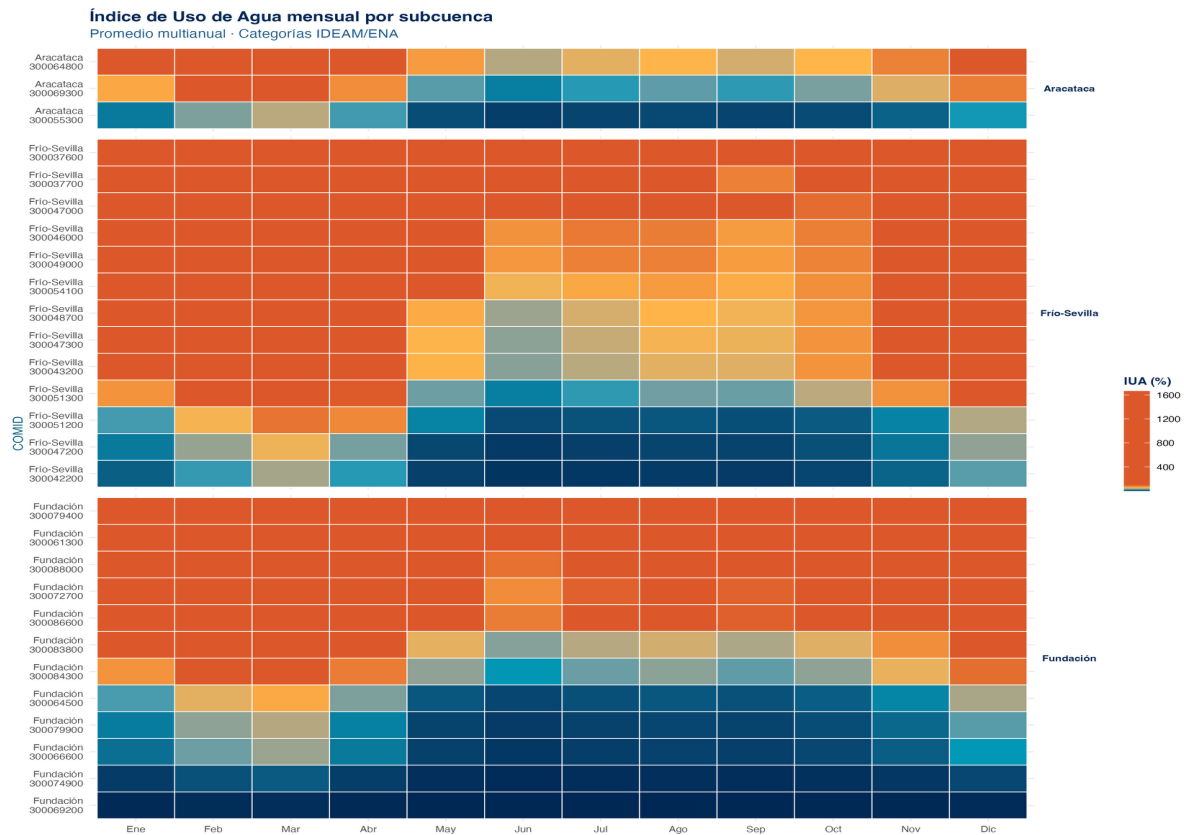


Figura 10. Índice de Uso de Agua mensual por subcuenca. Los colores cálidos indican presión alta o muy alta (>50%). La mayoría de los puntos de Frío-Sevilla y Fundación superan este umbral durante más de la mitad del año.

Mensaje clave: La presión hídrica es estructural, no solo estacional. En Frío-Sevilla, la demanda supera la oferta neta durante todo el año, y en marzo la quintuplica. Esta situación requiere estrategias de gestión que van más allá del manejo estacional.

5.3. Clasificación de vulnerabilidad

Se clasificó cada punto de monitoreo según el número promedio de meses por año en que el IUA supera el 50%. Los resultados, resumidos en la Tabla 3, son preocupantes: de los 28 puntos evaluados, **19 (68%) presentan vulnerabilidad "Alta" o "Muy alta"**, y solo uno (3,6%) no experimenta déficit en ningún mes. El 96% de los puntos muestra algún nivel de déficit.

Tabla 3. Distribución de puntos de monitoreo por nivel de vulnerabilidad hídrica. La vulnerabilidad "Muy alta" indica más de 6 meses al año con IUA superior al 50%.

Cuenca	Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Sin déficit	Total
Aracataca	0	2	0	1	0	3
Frío-Sevilla	6	4	1	2	0	13
Fundación	5	2	1	3	1	12
Total	11	8	2	6	1	28

La distribución espacial de esta clasificación se presenta en la Figura 11, donde se evidencia que la vulnerabilidad sigue un patrón geográfico vinculado a la posición en la cuenca y la densidad de demandas.

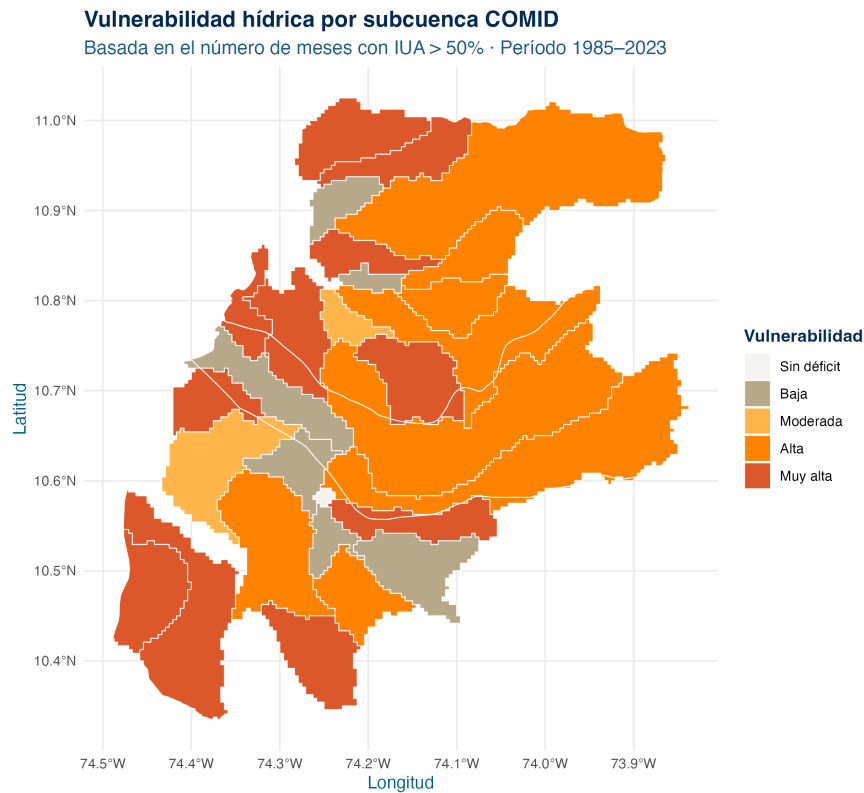


Figura 11. Mapa de vulnerabilidad hídrica. Las categorías "Alta" y "Muy alta" (colores cálidos) predominan en las zonas media y baja, donde se concentran las plantaciones de palma.

5.4. Déficit volumétrico: ¿cuánta agua falta?

El déficit total estimado para las tres cuencas asciende a **618 hm³/año** (618 millones de metros cúbicos anuales). Para dimensionar esta cifra: equivale aproximadamente al volumen de agua que consume toda la ciudad de Barranquilla en un año. Como se detalla

en la Figura 12, Fundación concentra el 49% de este déficit (301 hm³/año), seguida de Frío-Sevilla (39%, 239 hm³/año) y Aracataca-Tucurínca (13%, 78 hm³/año).

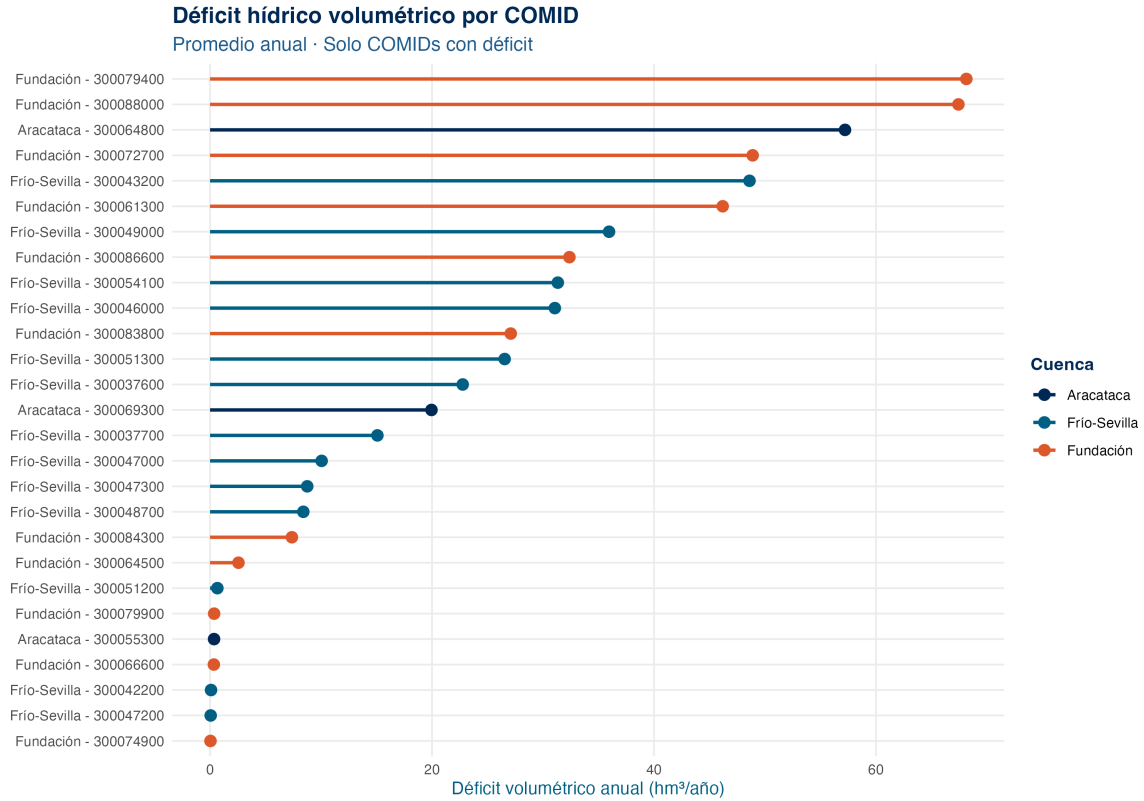


Figura 12. Déficit hídrico anual por subcuenca, ordenado por magnitud. Un número reducido de subcuencas concentra la mayor parte del déficit total.

Mensaje clave: El déficit hídrico total de la región asciende a 618 millones de metros cúbicos al año. Este déficit es estructural: persiste bajo condiciones climáticas normales y se agrava significativamente durante eventos El Niño.

6. Implicaciones para el cultivo de palma de aceite

La palma de aceite requiere un suministro hídrico sostenido para alcanzar rendimientos óptimos. Una investigación reciente realizada por Cenipalma en la Zona Norte de Colombia (Delgado, Ladino & Arias, 2024) evaluó experimentalmente el efecto de cinco condiciones de riego (50, 150, 300, 450 y 600 litros por palma por día) sobre el desarrollo y la producción de palmas adultas en el municipio Agustín Codazzi, departamento del Cesar. Los resultados mostraron que aplicaciones de agua inferiores a 300 L/palma/día afectan negativamente el cultivo de manera estadísticamente significativa ($p < 0,05$), particularmente en el índice de área foliar, la emisión de hojas y el rendimiento en racimos de fruta fresca (RFF). El tratamiento de 50 L/palma/día produjo la mayor reducción acumulada de rendimiento: un 26% menos que el tratamiento óptimo de 450 L/palma/día.

Estos hallazgos son especialmente relevantes porque fueron obtenidos bajo las condiciones agroclimáticas específicas de la Zona Norte colombiana, la región palmera con las temperaturas más altas (33,4 °C promedio), la menor precipitación anual y los períodos secos más prolongados del país, con más de seis meses consecutivos con menos de 100 mm de lluvia (Delgado et al., 2024). El estudio determinó que la evapotranspiración promedio del cultivo adulto oscila entre 5,4 y 5,7 mm por día, con valores máximos de 6 a 7 mm diarios durante el estiaje (diciembre-marzo), precisamente cuando la oferta hídrica de las cuencas se encuentra en su punto más bajo.

6.1. El desacople temporal entre oferta y demanda

Un hallazgo particularmente relevante para los palmicultores es el desacople entre el período de mayor estrés hídrico y las necesidades del cultivo. La fase de llenado de racimos, que es la de mayor demanda de agua y que precede a la cosecha principal (abril-junio), coincide precisamente con el final del estiaje (enero-marzo). Delgado et al. (2024) documentaron que los déficits hídricos en el suelo fueron mayores entre diciembre y marzo, coincidiendo con los períodos de sequía, y que bajo condiciones de estrés hídrico la palma responde rápidamente disminuyendo la tasa de apertura de hojas y acumulando flechas sin abrir. Estudios de Fedepalma y Cenipalma han documentado que tras el evento Super Niño de 2015-2016, la producción de palma se redujo un 20% en la Zona Norte (Fedepalma, 2017), confirmando la alta sensibilidad del cultivo a la disponibilidad hídrica.

Adicionalmente, Delgado et al. (2024) encontraron que las condiciones de déficit hídrico también afectaron el contenido de aceite: se observó una reducción del potencial oleico del 3% al 8% en tratamientos con aplicaciones inferiores a 300 L/palma/día. Este efecto, sumado a las reducciones de rendimiento en RFF del 6% al 25% según la severidad del déficit, tiene implicaciones económicas directas para los palmicultores de la región. Los autores determinaron que el coeficiente de cultivo (K_c) promedio es de 0,88 a 0,9, pero se reduce hasta 0,4–0,5 bajo condiciones de estrés, lo que refuerza la importancia de mantener una oferta hídrica adecuada durante todo el año.

6.2. Cuencas con mayor riesgo para las plantaciones

Frío-Sevilla es la cuenca de mayor riesgo para las plantaciones de palma de aceite. Con un IUA que supera el 50% durante prácticamente todo el año, un caudal de estiaje que apenas llega a 1,1 m³/s en condiciones normales, y 10 de sus 13 puntos clasificados como vulnerabilidad "Alta" o "Muy alta", esta cuenca enfrenta un desafío estructural que no puede resolverse únicamente con eficiencia en el riego.

Fundación, pese a su mayor volumen total, presenta 7 de sus 12 puntos en categorías de alta vulnerabilidad, concentrados en las zonas media y baja donde se ubican las plantaciones. Aracataca, con menor extensión palmera, tiene la situación relativamente más favorable pero no está exenta de estrés durante El Niño.

6.3. Qué significa en términos productivos

Considerando que durante un evento El Niño el caudal de Frío-Sevilla puede caer por debajo de 0,5 m³/s en marzo (menos de la mitad del ya escaso promedio de 1,1 m³/s), resulta evidente que la oferta superficial de agua no puede satisfacer simultáneamente las demandas de riego agrícola, abastecimiento doméstico y caudal ecológico en esta cuenca durante los meses críticos. Esta limitación no es un escenario extremo sino una condición recurrente asociada a los ciclos naturales del ENOS, que según las investigaciones de Poveda et al. (2001) presenta efectos más pronunciados sobre los caudales que sobre la precipitación, amplificando la señal de escasez.

Mensaje clave: Las plantaciones de palma de aceite en Frío-Sevilla y Fundación enfrentan un riesgo hídrico estructural. Según investigaciones de Cenipalma (Delgado et al., 2024), aplicaciones de riego inferiores a 300 L/palma/día reducen significativamente el rendimiento y el contenido de aceite. La combinación de estiaje estacional con eventos El Niño puede reducir la oferta de agua a niveles insuficientes para mantener el riego adecuado.

7. Glosario

COMID (Common Identifier): código numérico que identifica cada subcuenca en el sistema de modelación HydroBID. Cada COMID corresponde a un segmento de río con su área de drenaje asociada.

CORPAMAG: Corporación Autónoma Regional del Magdalena. Autoridad ambiental encargada de la administración del recurso hídrico en el departamento.

Caudal ecológico: volumen mínimo de agua que debe permanecer en el río para preservar los ecosistemas acuáticos. En este estudio corresponde al 35% del caudal medio.

Curva de duración de caudales: gráfico que muestra qué porcentaje del tiempo un determinado caudal es igualado o superado. Permite evaluar la confiabilidad del suministro.

ENOS (El Niño-Oscilación del Sur): fenómeno climático cíclico que alterna entre fases cálidas (El Niño, asociado a sequías en Colombia) y frías (La Niña, asociada a excesos de lluvia).

Estiaje: período del año en que los caudales de los ríos alcanzan sus valores mínimos. En la zona de estudio corresponde a diciembre-marzo.

hm³ (hectómetro cúbico): unidad de volumen equivalente a un millón de metros cúbicos (1.000.000 m³).

HydroBID: plataforma de modelación hidrológica desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), diseñada para simular la disponibilidad de agua en América Latina y el Caribe.

IUA (Índice de Uso de Agua): relación porcentual entre la demanda y la oferta hídrica. Valores >50% indican presión "Alta" y >100% presión "Muy alta" según la clasificación del IDEAM.

Mann-Kendall: prueba estadística no paramétrica utilizada para detectar tendencias de aumento o disminución en series de datos a lo largo del tiempo.

Módulo de escorrentía: volumen de agua generado por unidad de área, expresado en mm/año. Permite comparar la productividad hídrica entre subcuencas de diferente tamaño.

Oferta hídrica bruta: volumen total de agua que genera una cuenca, basado en el caudal promedio histórico.

Oferta hídrica neta: volumen de agua disponible para uso productivo, después de descontar el caudal ecológico (65% de la oferta bruta en este estudio).

ONI (Oceanic Niño Index): índice basado en la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 del Pacífico tropical, utilizado por la NOAA para clasificar las fases del ENOS.

Q₅₀, Q₉₀, Q₉₅: caudales superados el 50%, 90% y 95% del tiempo, respectivamente. Q₉₀ y Q₉₅ representan condiciones de estiaje moderado y severo.

8. Referencias

Delgado, T., Ladino, G. & Arias, N. (2024). Evaluation of the effect of soil water conditions on the development and water requirements of adult oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in the Northern Region of Colombia. *Agronomy*, 14(9), 1976. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091976>

Fedepalma. (2017). Informe de gestión 2016. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. Bogotá, Colombia.

Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>

IDEAM. (2022). Estudio Nacional del Agua 2022. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.

Marengo, J. A. (1995). Variations and change in South American streamflow. *Climatic Change*, 31(1), 99–117. <https://doi.org/10.1007/BF01092983>

Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F. & Muñoz Castillo, R. (2014). Hydro-BID: An Integrated System for Modeling Impacts of Climate Change on Water Resources. Part 2. Inter-American Development Bank, Technical Note No. IDB-TN-529. Washington, D.C.

Pastor, A. V., Ludwig, F., Biemans, H., Hoff, H. & Kabat, P. (2014). Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 5041–5059. <https://doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>

Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N. & Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in ENOS-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169–2178. <https://doi.org/10.1029/2000WR900395>

Poveda, G., Álvarez, D. M. & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENOS: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>

Rincón-Soto, L. F. & Poveda, G. (2025). El Niño and La Niña signatures on daily inflows to Colombian hydropower reservoirs. *International Journal of Energy and Water Resources*. <https://doi.org/10.1007/s42108-025-00418-z>

Rodríguez-Eraso, N., Pabón-Caicedo, J. D., Bernal-Suárez, N. R. & Castiblanco Sierra, M. A. (2010). Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Salinas-Rodríguez, S. A., Barrios-Ordóñez, J. E., Sánchez-Navarro, R. & Wickel, A. J. (2018). Environmental flows and water reserves: Principles, strategies, and contributions to water and

conservation policies in Mexico. *River Research and Applications*, 34(8), 1057–1084.
<https://doi.org/10.1002/rra.3334>

Valencia, J., Frankenberger, J., Cherkauer, K., Martín Lopez, J. M., Monserrate, F. & da Silva, M. (2022). Water sufficiency for cacao production in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) region, Colombia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101255.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101255>