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

Septiembre 2026

Evaluación de la disponibilidad hídrica actual

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 Frío-Sevilla, Aracataca-Tucurinca y Fundación abastecen a miles de hectáreas de plantación, 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 a 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 nacen en las estribaciones de la Sierra Nevada y descienden hacia la planicie aluvial del río Magdalena, donde se concentran las plantaciones de palma de aceite y otros cultivos agrícolas, principalmente banano. Dentro del dominio simulado por el modelo hidrológico, el área acumulada que drena hacia los puntos de salida de cada cuenca es de 2 628 km² en Aracataca-Tucurinca, 2 174 km² en Frío-Sevilla y 3 269 km² en Fundación.
La región presenta un régimen climático tropical con influencia del Caribe, caracterizado por un patrón bimodal de lluvias 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 se traducen en una marcada heterogeneidad espacial de la precipitación interpolada sobre las subcuencas.

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. El modelo simula, además, el resto de la red de drenaje hasta completar 54 subcuencas en las tres cuencas, que es la base sobre la que se distribuye la demanda hídrica (sección 5).

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, usando exclusivamente observaciones directas del IDEAM (sin series imputadas o reconstruidas por regresión). Los caudales de cada subcuenca son enrutados: acumulan el aporte de todas las subcuencas situadas aguas arriba. El modelo corre con un mismo juego de cuatro parámetros por cuenca, de modo que las diferencias entre subcuencas son consistentes con el clima interpolado y el área de drenaje acumulada, no con inferencias sobre pendiente o cobertura del suelo. Los

detalles de la calibración se documentan en los reportes de las actividades 2.1.3, 2.1.4 y 2.2.2 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 a 2023, expresado en hectómetros cúbicos por año (hm^3/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 la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (numeral 3.4.2), adoptada por CORPAMAG, se reserva el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de cada subcuenca, un valor constante a lo largo del año que se calcula de forma independiente para cada uno de los 28 puntos estratégicos; ese mes de referencia es marzo en 17 de ellos y abril en los 11 restantes. Como el caudal mínimo mensual es una fracción pequeña del caudal medio anual, esta reserva equivale, según la subcuenca, a entre el 4.3% y el 10.5% del caudal medio.

Oferta hídrica neta: es el caudal medio de cada subcuenca menos el caudal ecológico constante que le corresponde. A diferencia del caudal ecológico, no es una fracción fija: varía con el peso relativo del mes más seco en cada punto.

Índice de Uso del Agua (IUA): es la relación porcentual entre la demanda y la oferta hídrica disponible (la oferta bruta menos el caudal ecológico), definida por el IDEAM en la hoja metodológica del indicador (versión 1.3) que acompaña al Estudio Nacional del Agua. Sigue seis categorías: Muy bajo (hasta 1%), Bajo (1 a 10%), Moderado (10 a 20%), Alto (20 a 50%), Muy alto (50 a 100%) y Crítico (superior a 100%).

2.5. Alcance y supuestos

El modelo hidrológico corre con un mismo juego de cuatro parámetros por cuenca (actividad 2.2.2), de modo que las diferencias de oferta entre subcuencas de una misma cuenca son consistentes con el clima interpolado y el área de drenaje acumulada, y no reflejan diferencias de pendiente o cobertura vegetal. El caudal simulado en cada punto es enrutado, por lo que las cifras que se presentan por cuenca en este documento se calculan únicamente con los puntos terminales, aquellos que no drenan hacia otro punto estratégico, para no contar dos veces el mismo volumen de agua. La demanda hídrica que se cruza con la oferta en la sección 5 se estima para las 54 subcuencas del dominio simulado y se acumula aguas arriba de cada punto estratégico, sin incluir un sector ecológico independiente, porque el caudal ecológico ya se descuenta del lado de la oferta. El Índice de Uso del Agua que se presenta es superficial: no descuenta el uso de aguas subterráneas ni los retornos de riego que se reutilizan aguas abajo, de modo que

valores muy altos deben leerse como una medida de presión estructural sobre el recurso y no como el volumen físicamente extraído en cada punto.

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 a lo largo de las cuencas. Para visualizar esta heterogeneidad, la Figura 1 presenta el módulo de escorrentía, es decir, la cantidad de agua generada por unidad de área acumulada que drena hacia cada uno de los 28 puntos estratégicos. Este indicador, expresado en milímetros por año, permite comparar subcuencas de tamaños diferentes en igualdad de condiciones. Sus valores están entre 403 y 1 043 mm/año; como el modelo usa un mismo juego de parámetros para todas las subcuencas de una misma cuenca, esta variabilidad es consistente con la precipitación y la temperatura interpoladas sobre cada área de drenaje, y no permite atribuir los valores más altos o más bajos a un gradiente entre cabecera y llanura.

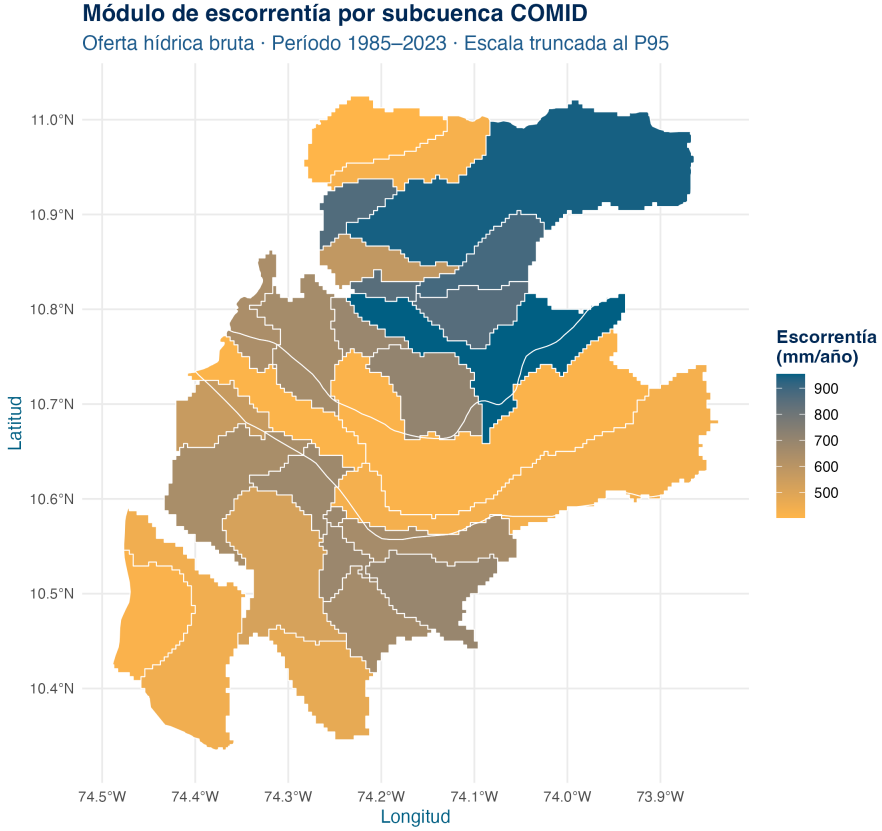

Figura 1. Módulo de escorrentía por subcuenca COMID (mm/año), calculado como caudal medio enrutado sobre área acumulada. Escala de color truncada al percentil 95. Período 1985 a 2023.

3.2. Comparación entre cuencas

La Tabla 1 sintetiza la oferta hídrica por cuenca, sumando únicamente los puntos terminales para no contar dos veces el mismo caudal.

Tabla 1. Oferta hídrica por cuenca, calculada con los puntos terminales. Área drenada: suma de las áreas acumuladas de los terminales.

Cuenca	Puntos	Terminales	Área drenada (km²)	Vol. bruto (hm³/año)	Vol. neto (hm³/año)
Aracataca	3	1	2 628	1 078	991
Frío-Sevilla	13	8	1 997	1 643	1 549
Fundación	12	4	3 058	1 894	1 738

Fundación genera el mayor volumen bruto, 1.8 veces el de Aracataca-Tucurinca y 1.2 veces el de Frío-Sevilla, pese a que las tres cuencas tienen áreas de drenaje del mismo orden de magnitud. Tras descontar el caudal ecológico de cada punto, la oferta neta conserva la misma jerarquía entre cuencas. La Figura 2 muestra esta composición.

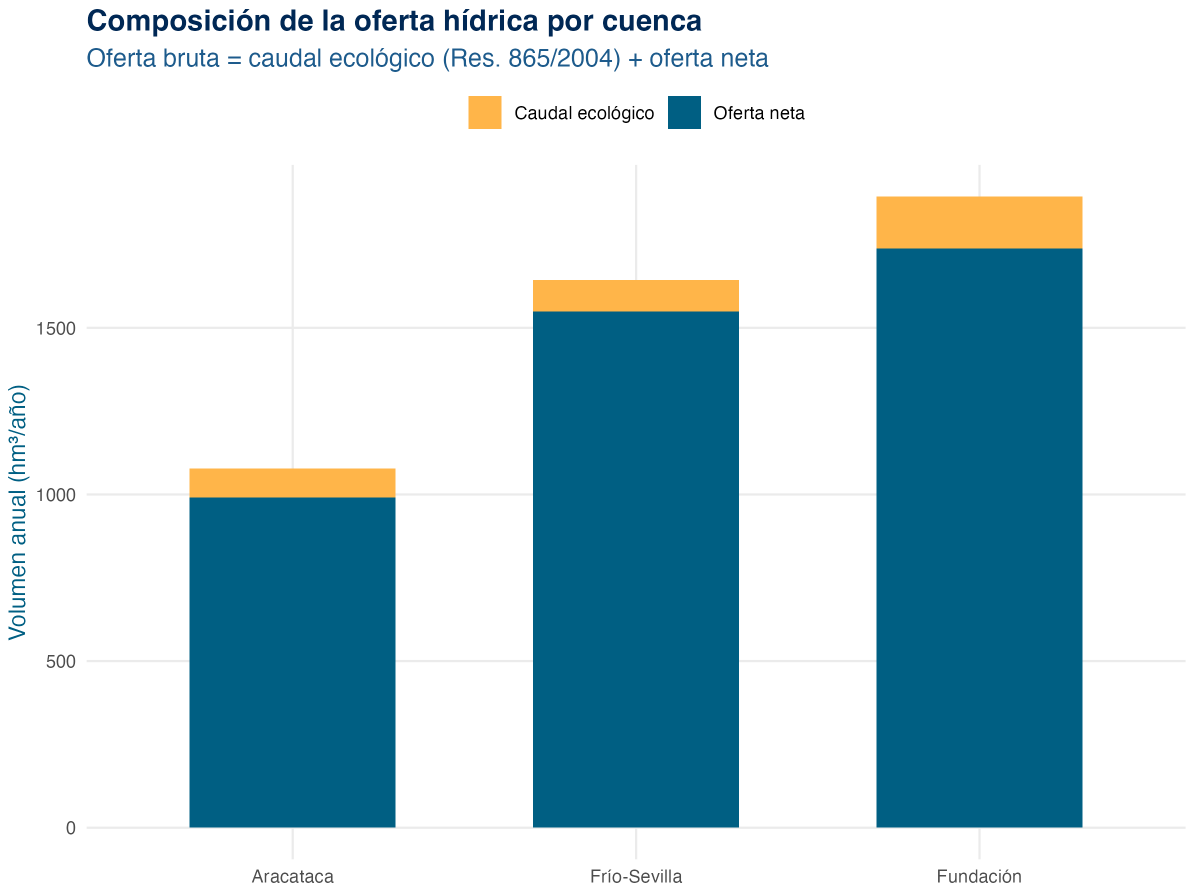

Figura 2. Composición de la oferta hídrica anual por cuenca, sumando los puntos terminales: oferta neta disponible y caudal ecológico reservado según la Resolución 865 de 2004.

Mensaje clave: La disponibilidad de agua varía enormemente entre cuencas. Fundación dispone de 1.8 veces más agua bruta que Aracataca-Tucurinca, pero las tres cuencas deben reservar el caudal ecológico de la Resolución 865 de 2004 antes de que el agua pueda destinarse a otros usos.

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. Promediando las curvas de los puntos estratégicos de cada cuenca, el caudal superado el 90% del tiempo (Q90) equivale al 32% de la mediana en Aracataca-Tucurinca, al 22% en Frío-Sevilla y al 35% en Fundación.

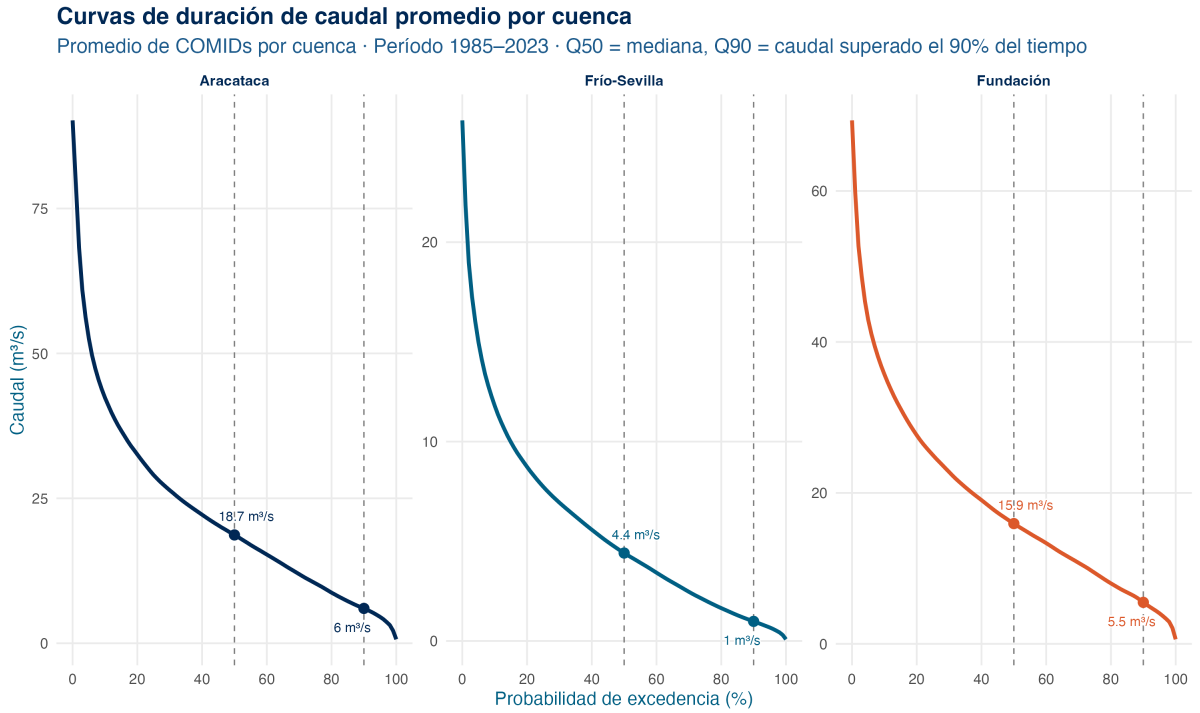

Figura 3. Curvas de duración de caudal promediadas por cuenca, con los valores de Q50 y Q90 anotados. Período 1985 a 2023.

Mensaje clave: Frío-Sevilla es la cuenca con peor regulación natural. En períodos secos, su caudal disponible se reduce a apenas el 22% del valor mediano, lo que representa un riesgo significativo para el abastecimiento de las plantaciones.

Aracataca-Tucurinca y Fundación muestran una regulación natural algo más favorable: sus caudales disponibles el 90% del tiempo son de 6.0 y 5.5 m³/s respectivamente, en torno al 32% y al 35% de su caudal mediano. En contraste, el Q90 de Frío-Sevilla es de apenas 1.0 m³/s, lo que significa que durante el 10% del tiempo más seco su disponibilidad se reduce con mayor severidad que en las otras dos cuencas. 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 una recesión relativa en julio-agosto, conocida como el veranillo de San Juan, y un estiaje principal entre diciembre y marzo.

Los contrastes estacionales son considerables (Tabla que resume el cociente entre el caudal medio del mes más húmedo y del mes más seco de cada cuenca). Frío-Sevilla exhibe la mayor irregularidad estacional: su caudal medio de marzo (1.3 m³/s) equivale a apenas el 12.2% del de noviembre (10.9 m³/s), un cociente de irregularidad de 8.2. Aracataca-Tucurinca y Fundación presentan cocientes de irregularidad menores, 5.6 y 5.4 respectivamente, pero igualmente significativos para la planificación del riego.

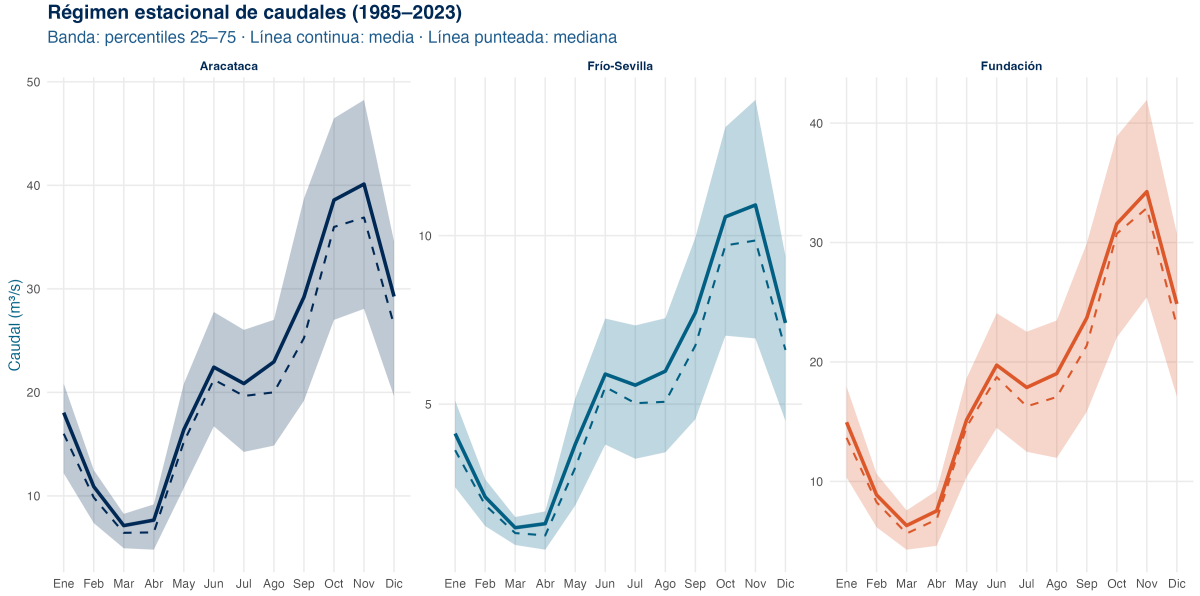

Figura 4. Régimen estacional de caudales por cuenca. La banda sombreada representa el rango intercuartílico, la línea continua el caudal medio y la línea punteada la mediana mensual multianual. Período 1985 a 2023.

La Figura 5 complementa el análisis mostrando la frecuencia de días con caudal superior a la media por mes y cuenca. Este indicador confirma la estructura bimodal: la frecuencia supera el 50% entre junio y diciembre en las tres cuencas, mientras que Marzo presenta la frecuencia más baja, entre el 0.1% y el 1.2% según la cuenca: prácticamente todos los días de ese mes registran caudales inferiores al promedio anual.

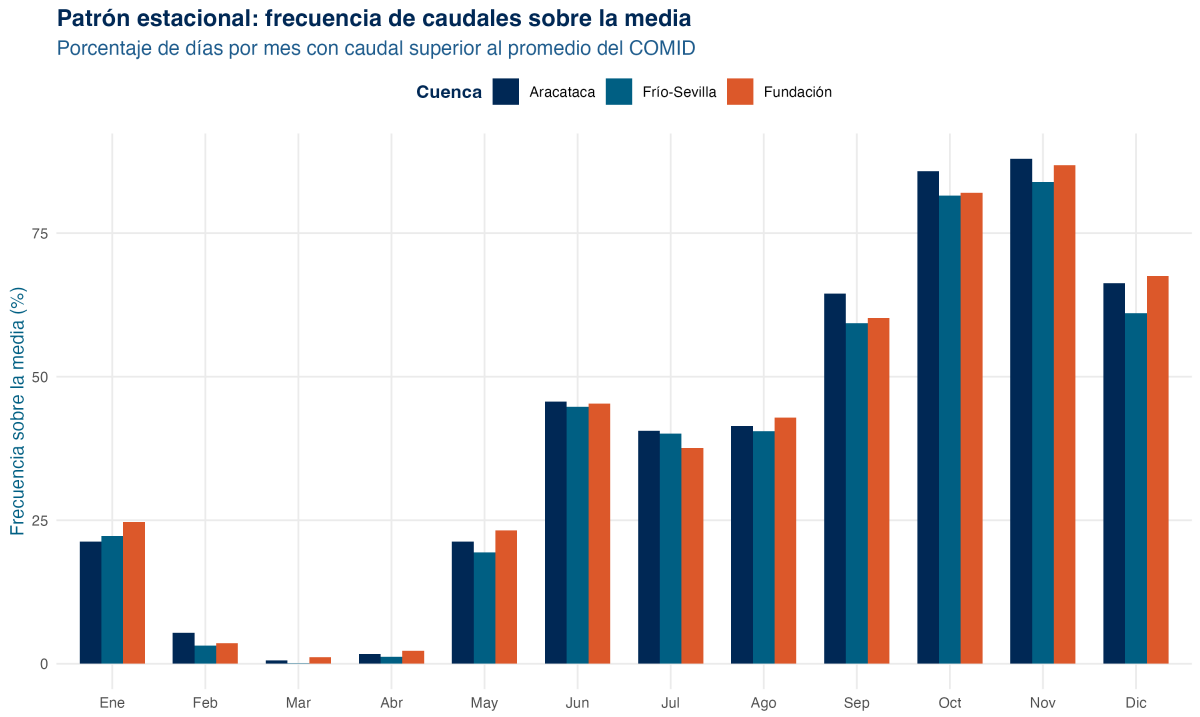

Figura 5. Frecuencia de días con caudal superior a la media del punto estratégico, por mes y cuenca. Valores inferiores al 50% indican predominio de caudales por debajo del promedio anual.

Mensaje clave: Marzo es consistentemente el mes más seco en las tres cuencas. En Frío-Sevilla, el caudal de marzo equivale a solo el 12.2% 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 a 2023 se identificaron 8 años Niño, 12 años Niña y 19 años neutros. El efecto sobre los caudales es consistente con lo reportado por Poveda et al. (2001), quienes documentaron que los efectos del ENOS sobre los caudales son incluso más fuertes que sobre la precipitación, por los efectos concomitantes sobre la humedad del suelo y la evapotranspiración.

Las cifras son elocuentes (Figuras 6 y 7): en promedio, los años La Niña presentan caudales entre un 40.1% y un 53.3% superiores a los de los años neutros, mientras que los años El Niño quedan entre un 25.3% y un 27.0% por debajo. La diferencia entre una fase y otra es de 88.2% a 109.9%. El año 2023, clasificado como Niño, fue el más seco del período en las tres cuencas, con anomalías de −63.2% en Aracataca-Tucurinca, −63.9% en Frío-Sevilla y −58.5% en Fundación. En el extremo opuesto, las mayores anomalías positivas se registraron durante el evento La Niña de 2010 y 2011: 2011 en Aracataca-Tucurinca (96.8%), 2010 en Frío-Sevilla (83.8%) y 2010 en Fundación (82.9%).

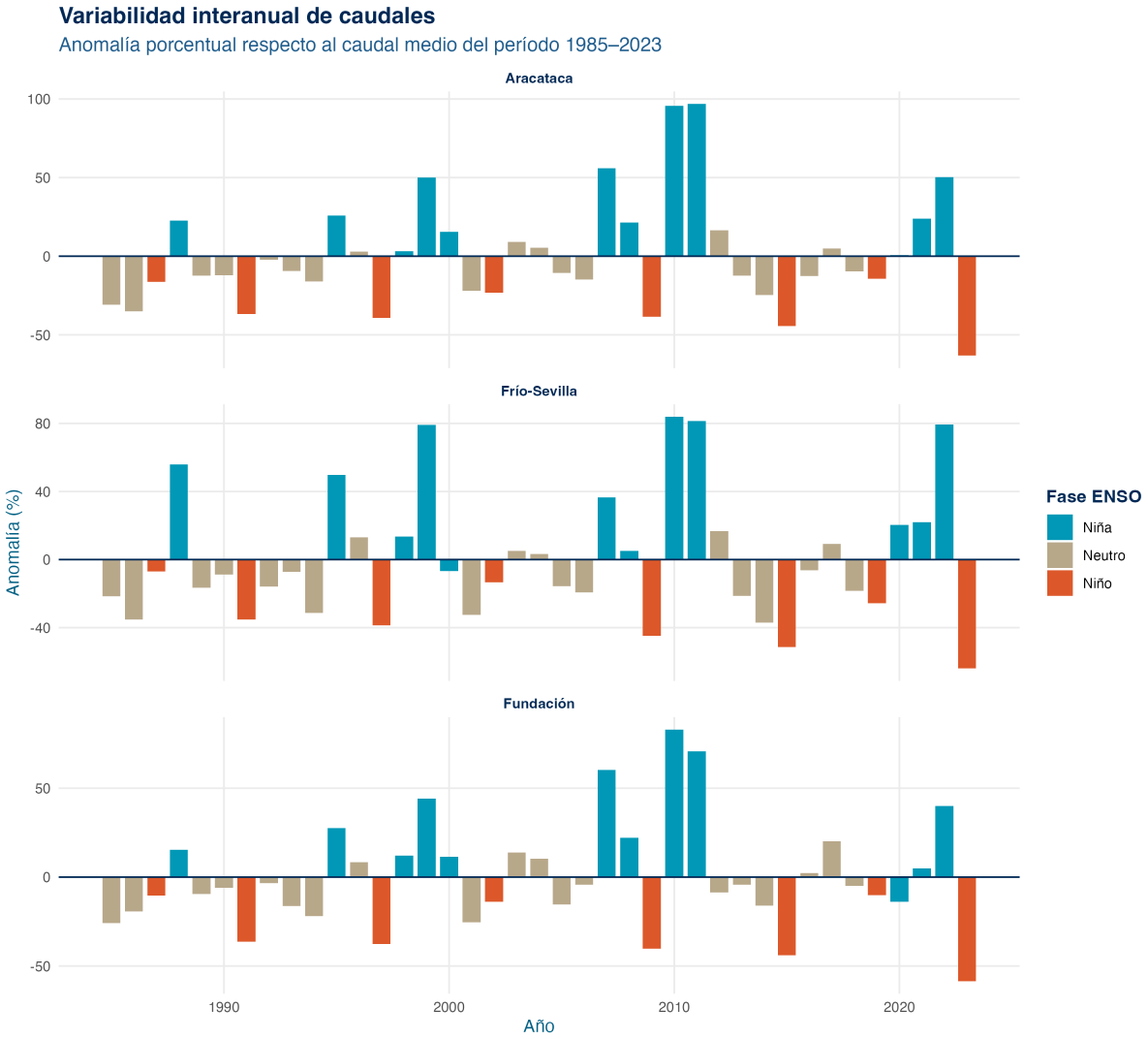

Figura 6. Anomalías porcentuales del caudal anual, clasificadas por fase ENOS. Los años El Niño se asocian con reducciones severas y los años La Niña con excedentes. Período 1985 a 2023.

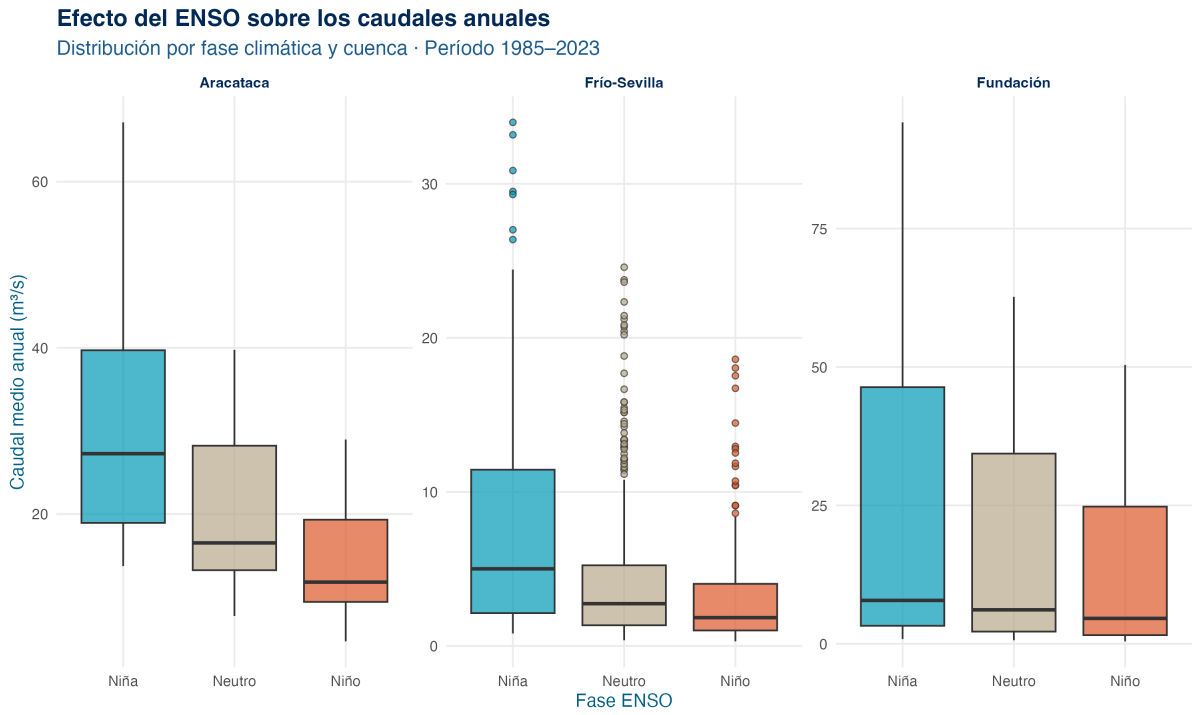

Figura 7. Distribución de caudales medios anuales por fase ENOS y cuenca. La separación entre las medianas de Niña y Niño confirma la modulación climática. **Mensaje clave:** El ENOS es el principal modulador de la variabilidad interanual. En años El Niño, los caudales se reducen en promedio entre un 25.3% y un 27.0% respecto a un año neutro, y en años La Niña pueden superarlo en más del 40%. La dispersión dentro de cada fase indica que la magnitud del impacto varía de un evento a otro, por lo que la planificación del riego no debe basarse en un único escenario promedio.

4.3. Tendencias de largo plazo

Se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall a la serie de caudales medios anuales de cada uno de los 28 puntos estratégicos. Bajo la hipótesis nula se esperan 1.4 rechazos espurios al 5%; sin corregir, 1 punto de los 28 resulta significativo (COMID 300079400, Fundación, con $\tau = 0.25$ y $p = 0.026$), un número compatible con el azar. Ese resultado no sobrevive la corrección por comparaciones múltiples: con la corrección de Holm el valor p ajustado es 0.73 y con Benjamini-Hochberg es 0.37, de modo que ningún punto (0 con Holm, 0 con BH) muestra una tendencia distinguible del azar. Como el modelo corre con parámetros constantes en el tiempo, cualquier tendencia en la serie simulada solo puede provenir del forzante climático interpolado, y no es atribuible a cambios de uso del suelo.

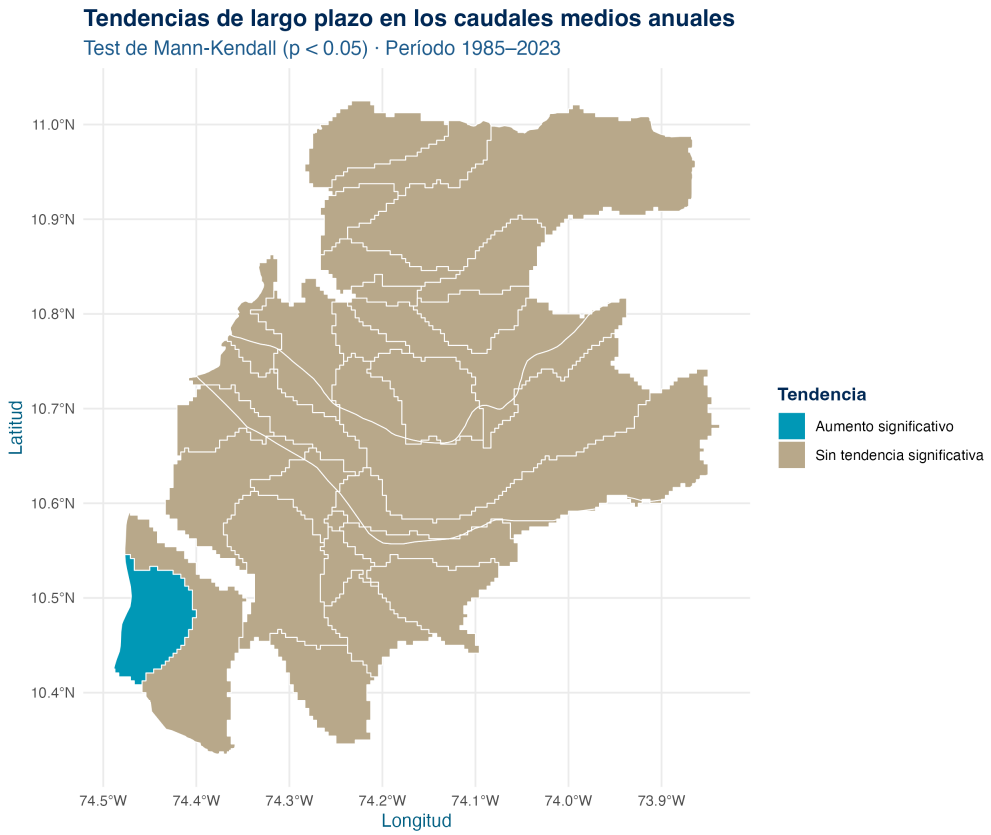

Figura 8. Tendencias en los caudales medios anuales por punto estratégico (test de Mann-Kendall, sin corrección por comparaciones múltiples). Ningún punto es significativo tras aplicar las correcciones de Holm o Benjamini-Hochberg. Período 1985 a 2023.

La lectura es la misma para toda el área de estudio: la variabilidad de los caudales simulados en 39 años responde a la oscilación climática interanual, dominada por el ENOS, y no a cambios direccionales del forzante climático en el período. Las estadísticas del período 1985 a 2023 constituyen, por tanto, una base razonable para la planificación hídrica, siempre que se considere la variabilidad asociada al ENOS.

5. ¿Dónde y cuándo el agua no alcanza?

La pregunta central para la gestión del recurso es si la oferta disponible alcanza para cubrir la demanda. Las demandas que se cruzan con la oferta neta en esta sección, estimadas en el objetivo 1 del proyecto, provienen del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable (RAS) y las proyecciones del DANE para el sector doméstico, de la zonificación agroclimática de Cenipalma para la palma de aceite y de un balance hídrico con datos PALMET para el banano; no corresponden a concesiones otorgadas por la

autoridad ambiental. La demanda se distribuye entre las 54 subcuencas del dominio simulado y se acumula aguas arriba de cada punto estratégico, para compararla con el caudal enrutado que allí se simula. La Tabla 2 resume la demanda anual por cuenca y sector.

En la palma de aceite no toda el agua captada se pierde para la cuenca. Del agua que se capta para riego, el cultivo consume una parte (la eficiencia de riego con la que se calculó la demanda: 0.39 en Frío-Sevilla y 0.32 en Aracataca-Tucurinca y Fundación) y el resto retorna. Una fracción de ese retorno, la **fracción recuperable** (φ), vuelve a los ríos, los canales o el acuífero de agua dulce y sigue disponible para otros usuarios aguas abajo; el resto se pierde hacia la ciénaga, hacia acuíferos salobres o por evaporación. Por eso, la demanda de palma que se compara con la oferta es la **demanda neta**: la captación bruta menos el retorno recuperable. Se adopta φ = 0.50, con una banda de incertidumbre de 0.40 a 0.65, a partir de la revisión de la FAO sobre el reúso del agua en sistemas agrícolas, según la cual el retorno de riego representa típicamente entre el 30% y el 50% de lo captado (Van Opstal et al., 2025), del caso de aplicación de la herramienta REWAS de la FAO y FutureWater a escala de sistema (Whiting et al., 2023) y de la cota superior cercana a 0.6 que Grafton et al. (2018) reportan para riego superficial. El banano y la demanda doméstica se mantienen como demanda bruta. Con este criterio, la demanda neta de palma es de 322.8 hm³/año, el 67% de la captación bruta.

Tabla 2. Demanda hídrica anual por cuenca y sector (hm³/año). Palma y banano: promedio de los años 2018, 2020 y 2022 de cobertura Corine Land Cover; doméstico: año 2024, asignado por la población residente dentro de cada cuenca. La palma se muestra como captación bruta y como demanda neta del retorno recuperable (φ = 0.50); el total y la participación de la palma usan la demanda neta, que es la que se compara con la oferta.

Cuenca	Palma bruta	Palma neta	Banano y plátano	Doméstico	Total	Palma (%)
Aracataca	165.6	109.9	9.6	3.4	122.9	89%
Frío-Sevilla	130.2	89.8	95.6	14.5	199.9	45%
Fundación	185.8	123.2	8.1	7.5	138.8	89%
Total	481.6	322.8	113.3	25.5	461.6	70%

5.1. Balance hídrico mensual

El balance mensual (oferta disponible menos demanda acumulada) muestra un patrón estacional claro (Figura 9). El déficit se presenta en febrero y marzo en Frío-Sevilla y en marzo en Aracataca-Tucurinca, siendo marzo el mes más crítico, con un balance promedio de −4.3 m³/s en Aracataca-Tucurinca y −7.8 m³/s en Frío-Sevilla. Fundación no presenta balance medio negativo en ningún mes (su mínimo es de 1.0 m³/s en marzo), aunque sí registra déficit en los años más secos. Entre mayo y diciembre la oferta disponible supera la demanda acumulada en las tres cuencas.

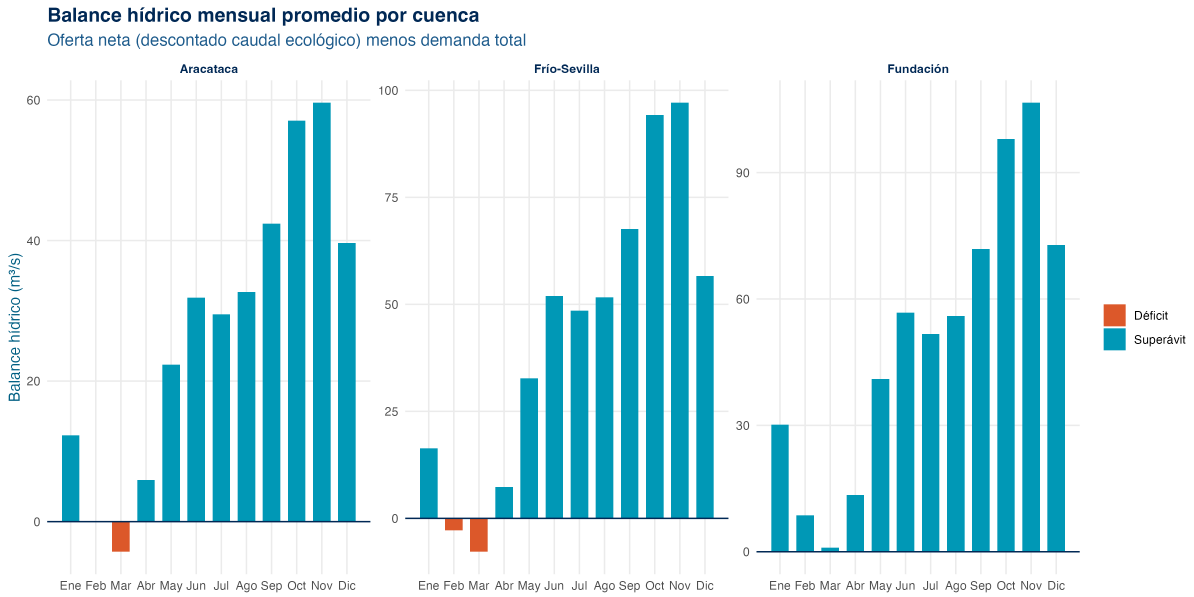

Figura 9. Balance hídrico mensual promedio por cuenca, sumando los puntos terminales: oferta disponible (caudal del mes menos caudal ecológico) menos demanda acumulada. Superávit en azul y déficit en naranja. Período 1985 a 2023.

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

El Índice de Uso del Agua (IUA) expresa la demanda acumulada como porcentaje de la oferta disponible. La Tabla 3 presenta el IUA mensual de cada cuenca.

Tabla 3. Índice de Uso del Agua mensual por cuenca (%), calculado como razón de medias multianuales sumando los puntos terminales. Valores superiores a 100 indican que la demanda acumulada supera la oferta disponible. En Aracataca (octubre, noviembre y diciembre), Frío-Sevilla (noviembre y diciembre) y Fundación (noviembre y diciembre) hubo un año con oferta disponible nula, excluido de la media de ese mes.

Cuenca	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Aracataca	52	99	152	34	0	0	0	0	0	0	0	7
Frío-Sevilla	54	116	182	33	1	1	1	2	1	0	1	14
Fundación	31	64	93	24	1	0	0	1	0	0	0	4

El máximo se alcanza en marzo, con 152% en Aracataca-Tucurinca, 182% en Frío-Sevilla y 93% en Fundación, es decir, una demanda acumulada de 0.9 a 1.8 veces la oferta disponible en ese mes. Entre mayo y noviembre, en cambio, el IUA de cuenca cae a categorías de presión baja o moderada. Dentro de la banda de incertidumbre de la

fracción recuperable (φ de 0.40 a 0.65), el IUA máximo de cuenca va de 130% a 166% en Aracataca-Tucurinca, de 169% a 191% en Frío-Sevilla y de 80% a 102% en Fundación; la demanda supera la oferta disponible en algún mes en Aracataca-Tucurinca, Frío-Sevilla y Fundación con φ = 0.40 y en Aracataca-Tucurinca y Frío-Sevilla con el valor adoptado. Al examinar la distribución dentro de cada cuenca (Figura 10) se aprecia que la presión no es homogénea: los puntos con poco caudal propio y mucha demanda acumulada concentran los valores más altos, mientras que los de mayor caudal mantienen niveles moderados en los mismos meses.

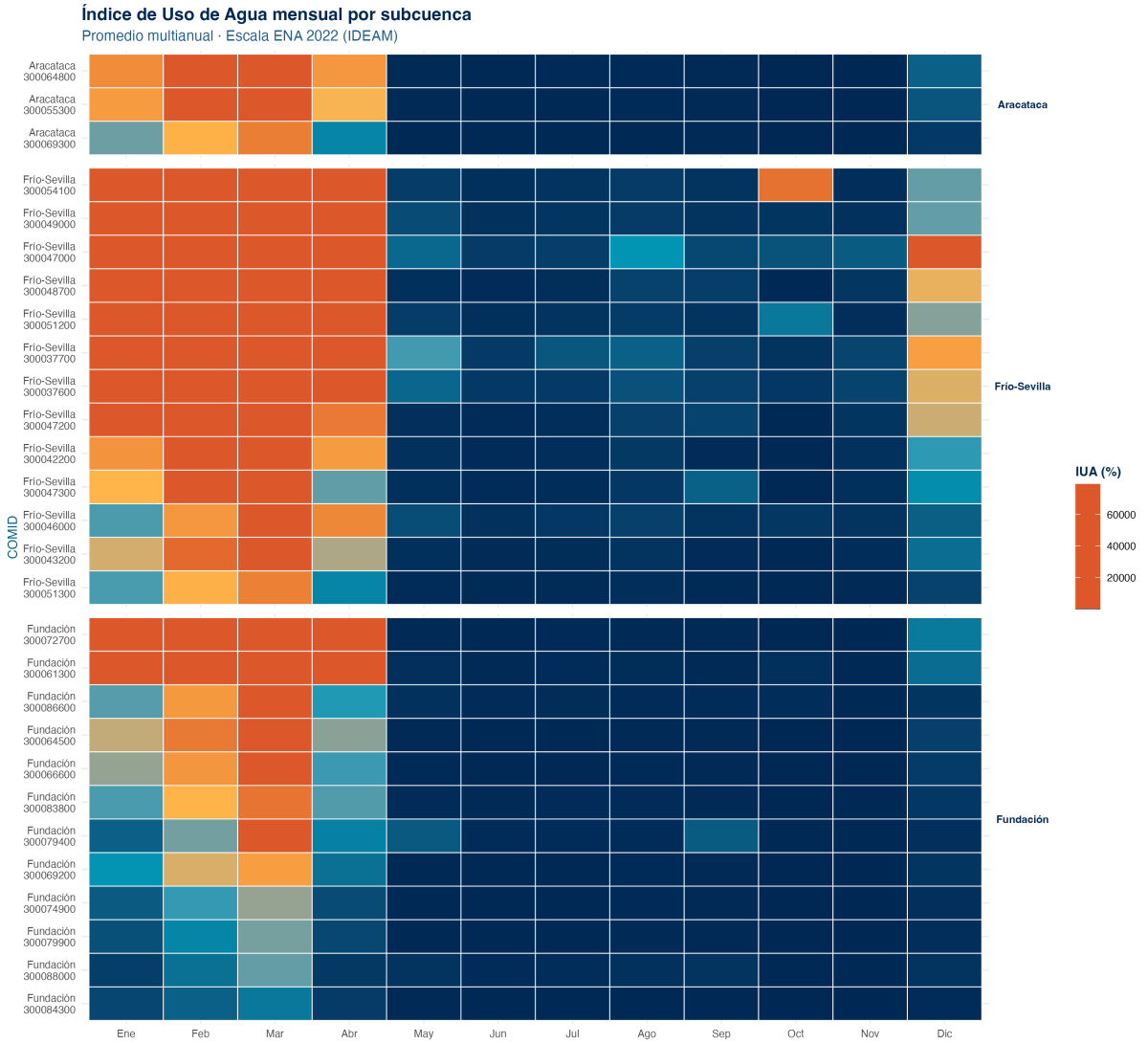

Figura 10. Índice de Uso de Agua mensual por subcuenca, promedio multianual. Colores cálidos: categorías Muy alto y Crítico (IUA mayor que 50%). Escala del ENA 2022.

Conviene interpretar estas magnitudes con cuidado. Un IUA muy superior al 100% en el estiaje indica que, con la oferta superficial natural y sin regulación, la demanda estimada no podría satisfacerse en ese mes: es una medida de presión estructural sobre el recurso, no del volumen físicamente extraído, ya que parte de la demanda puede cubrirse en la

práctica con aguas subterráneas, con almacenamiento o con un aprovechamiento de los retornos de riego mayor que la fracción recuperable adoptada, ninguno de los cuales entra en este balance superficial.

Mensaje clave: La presión hídrica es de gran magnitud durante el estiaje en las tres cuencas. En marzo, la demanda acumulada equivale a entre 0.9 y 1.8 veces la oferta disponible, mientras que entre mayo y noviembre la presión desciende a niveles bajos o moderados.

5.3. Clasificación de vulnerabilidad

Cada punto estratégico se clasifica según el número promedio de meses por año en que el IUA supera el 50%: Sin presión alta (ningún mes), Baja (hasta un mes), Moderada (más de uno y hasta tres), Alta (más de tres y hasta seis) y Muy alta (más de seis). La Tabla 4 resume la clasificación.

Tabla 4. Distribución de puntos estratégicos por nivel de vulnerabilidad hídrica y cuenca, según el número promedio de meses por año con IUA superior al 50%.

Cuenca	Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Sin presión alta	Total
Aracataca	0	1	2	0	0	3
Frío-Sevilla	0	9	4	0	0	13
Fundación	0	2	4	6	0	12
Total	**0**	**12**	**10**	**6**	**0**	**28**

De los 28 puntos evaluados, 12 (43%) se clasifican en vulnerabilidad Alta o Muy alta, ninguno en Muy alta. Frío-Sevilla es la cuenca más comprometida, con 9 de sus 13 puntos en Alta o Muy alta. Fundación tiene 2 de 12 puntos en esas categorías y concentra los puntos de vulnerabilidad Baja. Los 3 puntos de Aracataca-Tucurinca se distribuyen así: 1 en Alta y 2 en Moderada. La Figura 11 muestra la distribución espacial de esta clasificación.

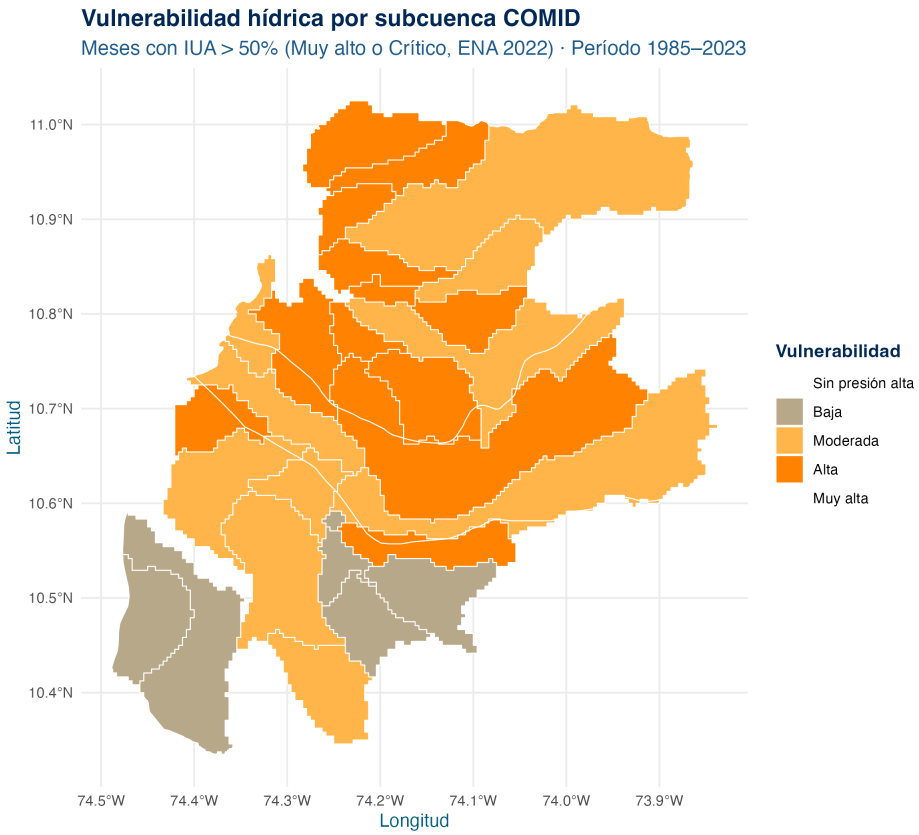

Figura 11. Vulnerabilidad hídrica por subcuenca COMID según el número de meses al año con IUA superior al 50% (categorías Muy alto y Crítico del ENA 2022). Período 1985 a 2023.

5.4. Déficit volumétrico: ¿cuánta agua falta?

El déficit de cada punto es el volumen anual promedio en que la demanda acumulada supera la oferta disponible en ese lugar; como la demanda se acumula aguas arriba, el déficit del punto de salida de una cuenca ya contiene el de las subcuencas que drenan a él, de modo que el déficit de cuenca se calcula sumando solo los puntos terminales. Con ese criterio, el déficit total en las tres cuencas asciende a 95 hm³/año: 61 hm³/año en Frío-Sevilla (64%), 22 en Aracataca-Tucurinca (23%) y 13 en Fundación (14%). Según la fracción recuperable que se adopte dentro de su banda de incertidumbre, el déficit total varía entre 76 hm³/año ($\varphi = 0.65$) y 110 hm³/año ($\varphi = 0.40$), y Frío-Sevilla aporta la mayor parte en todo el rango.

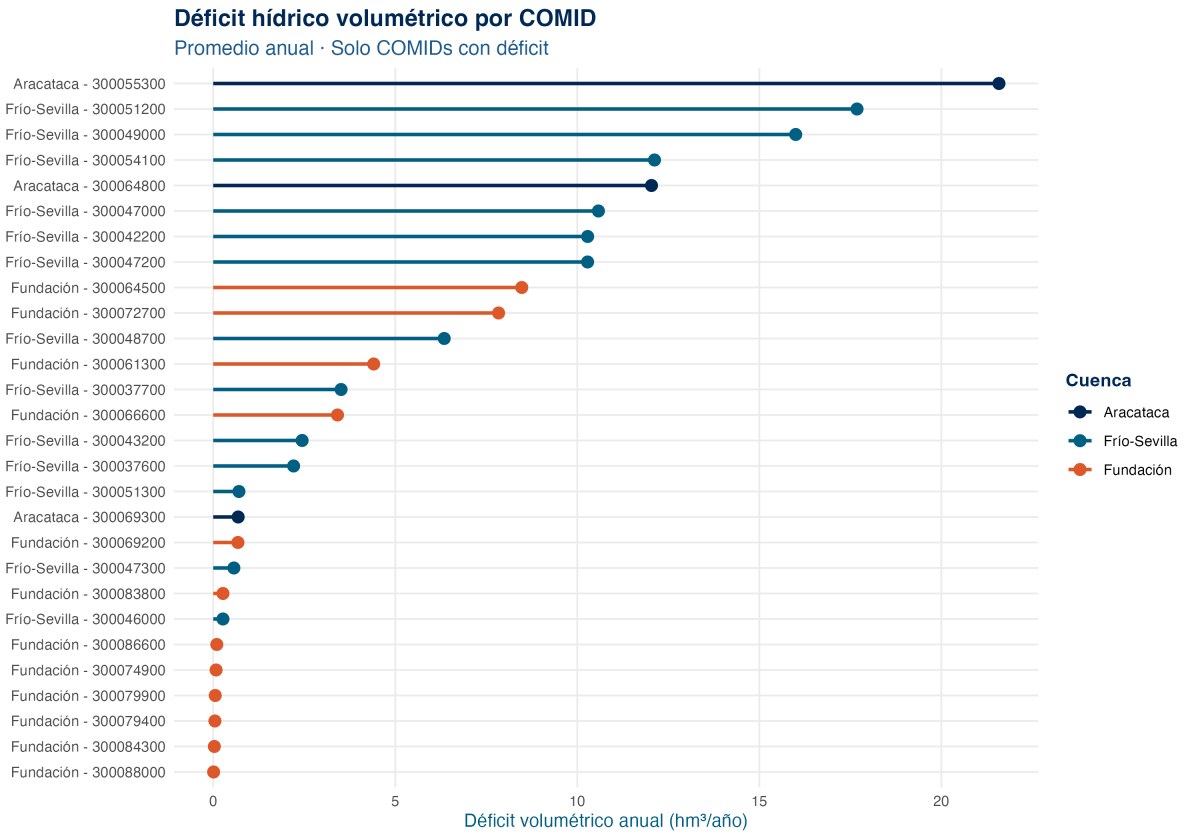

Figura 12. Déficit hídrico volumétrico anual promedio (hm³/año) por punto estratégico, ordenado por magnitud. El déficit de un punto incluye el de los puntos aguas arriba. **Mensaje clave:** El déficit hídrico total de las tres cuencas asciende a 95 hm³/año. En Aracataca-Tucurinca y Frío-Sevilla este déficit es estructural en el estiaje: se presenta con caudales medios y se agrava en años El Niño; en Fundación aparece sólo en años secos. El déficit describe la presión de la demanda neta sobre la oferta superficial natural, sin descontar aguas subterráneas ni almacenamiento. Con la incertidumbre de la fracción recuperable del retorno de riego, el déficit total se sitúa entre 76 y 110 hm³/año.

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. 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, la de mayor demanda de agua, que precede a la cosecha principal (abril-junio), coincide con el final del estiaje (febrero y marzo), el mismo período en que este estudio identifica el déficit hídrico estructural en Aracataca-Tucurinca y Frío-Sevilla (sección 5.1). 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 Súper Niño de 2015-2016, la producción de palma se redujo un 20% en la Zona Norte (Fedepalma, 2017), consistente con la alta sensibilidad del cultivo a la disponibilidad hídrica identificada en este análisis, donde un año El Niño reduce el caudal en promedio entre un 25.3% y un 27.0% respecto a un año neutro.

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 racimos de fruta fresca 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 (Kc) promedio es de 0.88 a 0.9, pero se reduce hasta 0.4 a 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: un IUA de cuenca que supera el 50% durante tres meses del estiaje, un caudal de estiaje que

apenas llega a 1.3 m³/s en condiciones normales, y 9 de sus 13 puntos clasificados como vulnerabilidad Alta o Muy alta, configuran un desafío estructural que no puede resolverse únicamente con eficiencia en el riego. Fundación, pese a su mayor volumen total, presenta 2 de sus 12 puntos en categorías de alta vulnerabilidad. Aracataca-Tucurinca, con menor extensión palmera, tiene 1 en Alta y 2 en Moderada de sus 3 puntos estratégicos, sin llegar a la categoría Muy alta, pero tampoco está exenta de estrés durante El Niño.

6.3. Qué significa en términos productivos

Considerando que un año El Niño típico reduce el caudal medio anual entre un 25.3% y un 27.0% respecto a un año neutro, y que en el año más seco del período (2023) la reducción llegó a 63.9% en la cuenca más afectada, resulta claro que la oferta superficial de agua no puede satisfacer simultáneamente las demandas de riego agrícola, abastecimiento doméstico y caudal ecológico en Aracataca-Tucurinca y Frío-Sevilla durante los meses de estiaje, ni en Fundación durante el estiaje de los años secos. 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 Aracataca-Tucurinca y Frío-Sevilla enfrentan un riesgo hídrico estructural en el estiaje, y las de Fundación, en los años secos. 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 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de cada subcuenca (Resolución 865 de 2004 del MAVDT, numeral 3.4.2, adoptada por CORPAMAG), un valor constante que equivale a una fracción pequeña del caudal medio anual.

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.
Demanda neta de palma: captación bruta de riego de palma menos el retorno recuperable, es decir, la parte del agua captada y no consumida por el cultivo que vuelve a la red o al acuífero dulce y sigue disponible aguas abajo. Es la demanda de palma que se compara con la oferta en el balance y en el IUA.
Fracción recuperable del retorno (φ): proporción del agua captada y no consumida por el cultivo que regresa a los ríos, los canales o el acuífero de agua dulce y puede volver a usarse aguas abajo. El complemento se pierde hacia la ciénaga, hacia acuíferos salobres o por evaporación.
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 del Agua): relación porcentual entre la demanda acumulada y la oferta hídrica disponible (oferta bruta menos caudal ecológico), según la hoja metodológica del IDEAM (versión 1.3) para el Estudio Nacional del Agua. Seis categorías: Muy bajo, Bajo, Moderado, Alto, Muy alto y Crítico; valores superiores al 50% corresponden a Muy alto o Crítico.
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 acumulada, 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 constante de cada subcuenca.
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.

Subcuenca terminal: subcuenca estratégica que no drena hacia otra subcuenca estratégica de la misma cuenca; sus volúmenes se suman sin duplicar caudal ya contado en otro punto.

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.

Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S. A., Wang, Y., Garrick, D. & Allen, R. G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. Science, 361(6404), 748-750. https://doi.org/10.1126/science.aat9314

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.

IDEAM. Hoja metodológica del indicador Índice de Uso del Agua (IUA), versión 1.3. Sistema de Información Ambiental de Colombia.

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

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 865 de 2004, por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales. Numeral 3.4.2, caudal mínimo ecológico.

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.

Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N. & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-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 ENSO: 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

Van Opstal, J., Droogers, P. & Kaune, A. (2025). Reuse of water in agricultural systems. Follow the Water. FAO, Bangkok. https://doi.org/10.4060/cd6520en

Whiting, L., Turral, H. & Droogers, P. (2023). Real water savings in agriculture. Next Generation Water Management Policy Briefs 1. FAO, Bangkok.