
Reporte de Actividad 3.2.2

Análisis de impactos de los escenarios de uso
del recurso hídrico optimizado en el balance
hídrico de la cuenca

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

La actividad 3.2.2 evalúa cómo se propagan al balance hídrico de las cuencas los escenarios de uso eficiente del agua simulados en la actividad 3.2.1. Mientras aquella cuantificó la reducción de la captación de riego, la presente confronta esa reducción con la oferta hídrica disponible, para determinar en qué medida los escenarios alivian las condiciones de déficit y vulnerabilidad identificadas en la actividad 2.3.3.

El análisis emplea el mismo marco contable de la actividad 2.3.3, lo que permite una comparación directa con la línea base: la oferta se toma de las series de caudal simuladas con HydroBID para el período de 1985 a 2023, se descuenta el caudal ecológico de la Resolución 865 de 2004 y la presión de uso se evalúa mediante el Índice de Uso del Agua (IUA) con las categorías del Estudio Nacional del Agua 2022 del IDEAM.

Como en la actividad 2.3.3, la demanda de palma no es la captación bruta sino la captación neta sobre la red, es decir, la que descuenta la fracción recuperable del retorno de riego ($\varphi = 0.50$), que vuelve a la red superficial o al acuífero dulce y sigue disponible aguas abajo. La diferencia es que aquí esa captación neta se recalcula para cada escenario de eficiencia.

2. Metodología

2.1. Alcance y supuestos

- **Demanda acumulada aguas arriba.** El caudal simulado en cada COMID es un caudal enrutado, que acumula lo que llega de aguas arriba. Por eso la demanda que se le confronta es la suma de las demandas de todos los COMIDs que drenan al punto (palma neta del escenario, banano y plátano, y demanda doméstica), calculada sobre los 54 COMIDs del dominio de modelación y no sólo sobre los 28 estratégicos.
- **Oferta disponible.** Es el caudal medio mensual simulado menos el caudal ecológico de la Resolución 865 de 2004 (25 % del caudal medio mensual multianual más bajo de cada COMID), descontado como caudal constante y con un mínimo de cero; se toma tal como lo calculó la actividad 2.3.1.
- **Índice de Uso del Agua.** Se calcula sobre la oferta disponible y se clasifica con la escala del ENA 2022: Muy bajo hasta 1 %, Bajo hasta 10 %, Moderado hasta 20 %, Alto hasta 50 %, Muy alto hasta 100 % y Crítico por encima de ese valor. El índice se refiere exclusivamente a la oferta superficial: no se consideran aguas subterráneas.
- **Vulnerabilidad.** Cada subcuenca se clasifica por el número medio de meses al año con IUA superior al 50 % (categorías Muy alto y Crítico), con los mismos cortes de la actividad 2.3.3.
- **Agregados por cuenca.** Las cifras por cuenca suman únicamente los COMIDs terminales, los que no drenan a otro COMID estratégico, para no contar dos veces el mismo caudal ni la misma demanda.
- **Retornos y eficiencia.** La captación neta de palma usa la eficiencia de línea base de cada cuenca (0.39 en Frío-Sevilla y 0.32 en Aracataca-Tucurín y Fundación; equivalente global 0.341) y la fracción recuperable del retorno $\varphi = 0.50$ adoptada de la literatura en la actividad 3.2.1, con banda de incertidumbre de 0.40 a 0.65 y modulada por zona. El retorno se descuenta en el mismo mes y en el mismo COMID donde se genera: no se simula su enrutamiento en el tiempo ni su tránsito por la red.

- **Demanda climatológica.** El perfil de demanda es el promedio de las coberturas de 2018, 2020 y 2022 aplicado a todos los años hidrológicos, sin variabilidad interanual; las metas de eficiencia son uniformes sobre toda la palma de cada cuenca.

2.2. Construcción del balance

Para cada subcuenca COMID i , año a y mes m , bajo cada escenario e :

$$Q_{i,a,m}^{\text{disp}} = \max(Q_{i,a,m} - Q_i^{\text{eco}}, 0) \quad (1)$$

$$D_{i,m}^e = \sum_{j \in \mathcal{U}(i)} (N_{j,m}^e + W_{j,m}^{\text{otros}} + W_{j,m}^{\text{dom}}) \quad (2)$$

$$B_{i,a,m}^e = Q_{i,a,m}^{\text{disp}} - D_{i,m}^e \quad (3)$$

$$\text{IUA}_{i,a,m}^e = \frac{D_{i,m}^e}{Q_{i,a,m}^{\text{disp}}} \times 100 \quad (4)$$

donde Q es el caudal medio mensual simulado, Q^{eco} el caudal ecológico constante del COMID, $\mathcal{U}(i)$ el conjunto formado por el COMID i y todos los que drenan a él, N^e la captación neta de palma bajo el escenario e , W^{otros} la demanda de los cultivos no intervenidos (banano y plátano) y W^{dom} la demanda doméstica. Estas dos últimas se mantienen constantes entre escenarios, de acuerdo con el alcance definido en la actividad 3.1.2, que circunscribe las tecnologías de UEA al cultivo de palma de aceite. Cuando la oferta disponible de un mes es cero, el índice no está definido y el mes se cuenta como Crítico.

El déficit corresponde a la parte negativa del balance, $\max(0, -B)$, y se acumula en volumen anual. Por construcción, un mes tiene déficit si y sólo si su IUA supera el 100 %.

Es importante señalar que el análisis emplea la **captación neta** y no la bruta. Esta elección es la conceptualmente correcta para un balance de cuenca: la presión que una extracción ejerce sobre el sistema es su consumo efectivo más la fracción de retorno que no regresa a la red aprovechable. Utilizar la captación bruta sobrestimaría la demanda al contabilizar como extraída el agua que retorna y sigue disponible aguas abajo. Como contraste cruzado, la línea base reproduce exactamente, registro a registro, el balance de la actividad 2.3.3 (13 104 combinaciones de COMID, año y mes); las dos actividades comparten así la misma oferta, la misma demanda neta de palma y la misma fracción recuperable.

2.3. Condiciones hidrológicas secas

Dado que el interés de gestión se concentra en las situaciones de escasez, se realizó un análisis específico sobre el quintil hidrológico más seco. Para cada cuenca se calculó el rango percentil del caudal de estiaje (diciembre a abril del año calendario, suma de sus COMIDs terminales) dentro del registro de 1985 a 2023 y se seleccionaron los años situados en el 20 % inferior (ocho años); todos los COMIDs de una cuenca comparten esos años, y el déficit anual se promedia sobre ellos. Se usa el caudal de estiaje y no el anual porque este último lo dominan los meses húmedos y no guarda relación con el déficit, que se concentra en la temporada seca. Este subconjunto representa las condiciones bajo las cuales la gestión de la demanda resulta más determinante.

3. Resultados

3.1. Balance anual por cuenca

Tabla 1: Déficit hídrico anual e Índice de Uso del Agua por cuenca y escenario. El déficit suma los COMIDs terminales de cada cuenca; el IUA de temporada seca (diciembre a abril) es la razón entre la demanda media y la oferta disponible media de la cuenca en esos meses

Cuenca	Escenario	Déficit (hm ³ /año)	Reducción del déficit	IUA seco (%)
Aracataca	Base	21.6		46.1
	E1	10.6	50.9 %	35.7
	E2	9.1	57.9 %	33.8
	E3	6.9	68.1 %	30.9
Frío-Sevilla	Base	60.9		50.0
	E1	50.4	17.3 %	45.7
	E2	47.7	21.8 %	44.4
	E3	43.5	28.6 %	42.6
Fundación	Base	12.9		28.4
	E1	5.8	55.3 %	21.1
	E2	4.9	62.1 %	20.0
	E3	3.7	71.7 %	18.1

El escenario E3, el más ambicioso, reduce el déficit hídrico anual entre un 28.6 % y un 71.7 % según la cuenca. La reducción es mayor en Fundación y menor en Frío-Sevilla, precisamente la cuenca de mayor criticidad. Este patrón es consistente con la estructura de la demanda: en Frío-Sevilla la presión hídrica proviene en proporción considerable de subcuencas con caudales muy bajos en relación con su demanda acumulada, donde la reducción parcial de la captación de palma no alcanza a cerrar la brecha.

El déficit de la línea base coincide con el que reporta la actividad 2.3.3 para las mismas cuencas (21.6, 60.9 y 12.9 hm³/año en Aracataca, Frío-Sevilla y Fundación), porque ambas actividades confrontan con la oferta la misma demanda neta de palma, que descuenta la fracción recuperable $\varphi = 0.50$ del retorno. La captación bruta de las bocatomas, que no descuenta el retorno, se reporta en la actividad 3.2.1 y mide la presión local en cada punto de captación, no la presión sobre el balance de la cuenca.

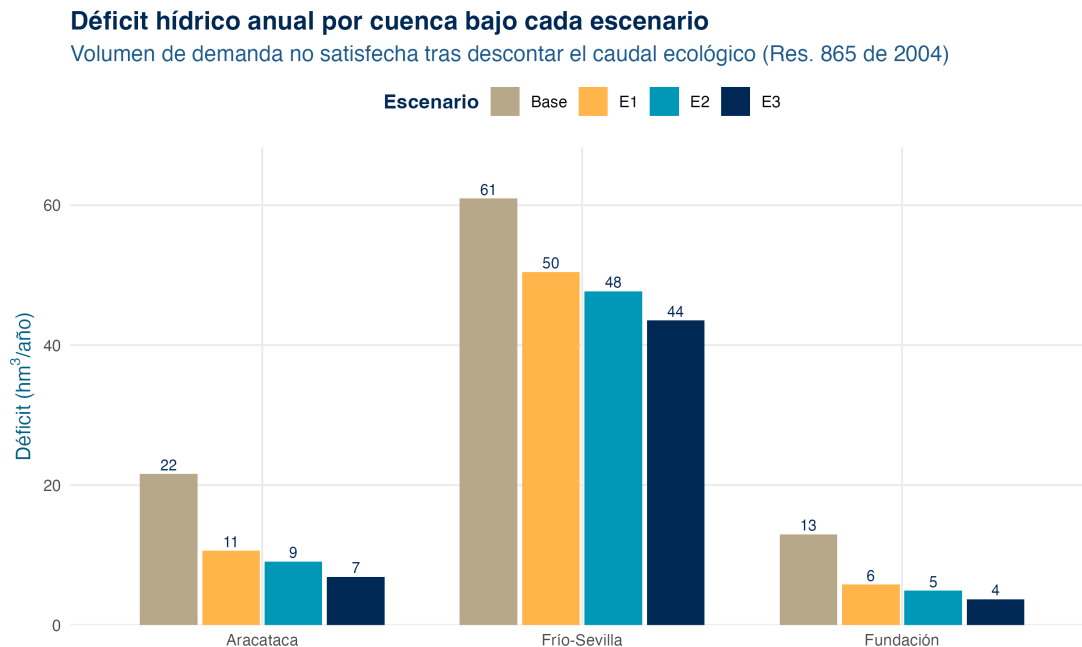


Figura 1: Déficit hídrico anual por cuenca y escenario. En la línea base, el déficit de Frío-Sevilla es de 3 a 5 veces el de las otras dos cuencas.

3.2. Persistencia de las zonas críticas

Hallazgo principal. De las 7 subcuencas cuyo IUA medio supera el 100 % en la línea base (categoría Crítico del ENA 2022), 6 siguen en esa categoría bajo el escenario E3 y 300072700 (Fundación) sale de ella. De las 28 subcuencas, 5 cambian de categoría de IUA y 7 cambian de nivel de vulnerabilidad, en todos los casos por un solo escalón y desde posiciones cercanas al umbral; el número de subcuencas con vulnerabilidad Alta o Muy alta pasa de 12 a 10.

Las subcuencas que cambian de categoría de IUA son 300061300 (Fundación, de Muy alto a Alto), 300064500 (Fundación, de Alto a Moderado), 300069200 (Fundación, de Moderado a Bajo), 300072700 (Fundación, de Crítico a Muy alto) y 300086600 (Fundación, de Muy alto a Alto); las que cambian de nivel de vulnerabilidad son 300042200 (Frío-Sevilla, de Alta a Moderada), 300051300 (Frío-Sevilla, de Moderada a Baja), 300064800 (Aracataca, de Alta a Moderada), 300066600 (Fundación, de Moderada a Baja), 300069300 (Aracataca, de Moderada a Baja), 300083800 (Fundación, de Moderada a Baja) y 300086600 (Fundación, de Moderada a Baja).

Este resultado converge con la conclusión del estudio de Findeter, Asbama y Fedepalma (2017-2018), que estableció que aun implementando la Alternativa 0 de optimización del riego, las cuencas de los ríos Tukurinca, Sevilla y Frío mantendrían un déficit remanente conjunto de 7.11 m³/s. La presente simulación, construida sobre datos y métodos independientes de aquel estudio, reproduce cualitativamente ese mismo diagnóstico.

Vulnerabilidad hídrica por subcuenca: línea base frente a escenario E3

Clasificación según el número medio de meses al año con IUA > 50% (Muy alto o Crítico, ENA 2022)

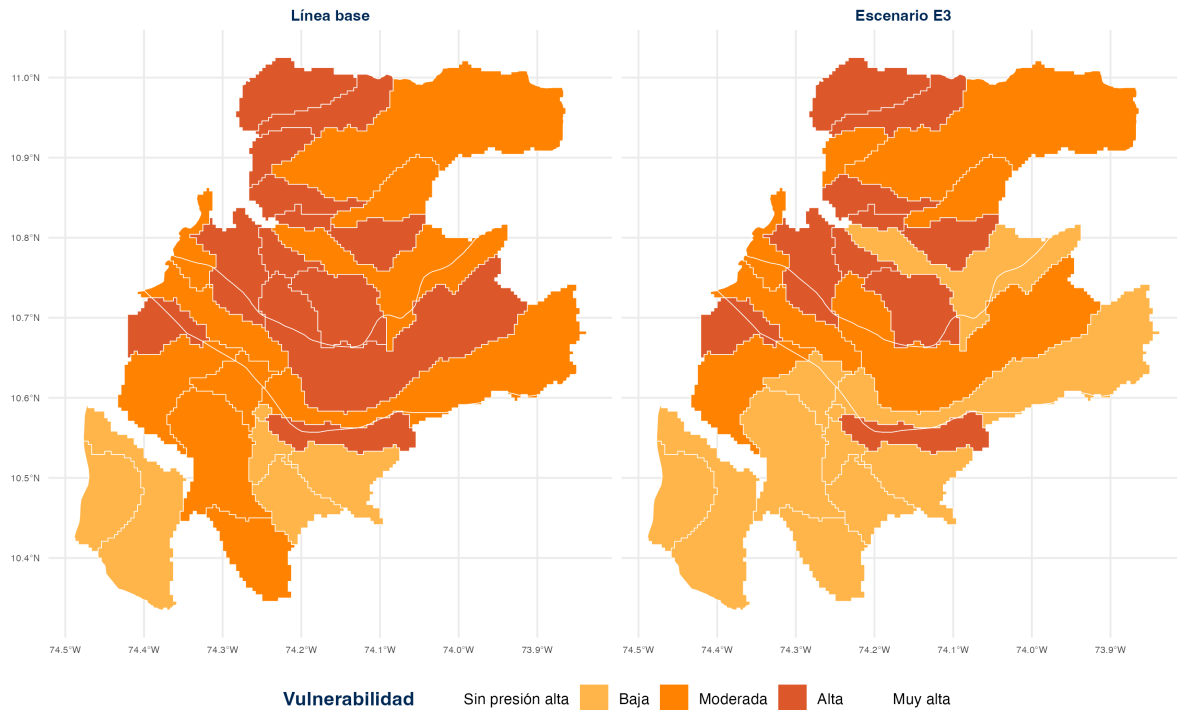


Figura 2: Vulnerabilidad hídrica por subcuenca en la línea base y bajo el escenario E3, según el número medio de meses al año con IUA superior al 50 %. La escasa diferencia cromática entre ambos paneles es el resultado sustantivo del análisis.

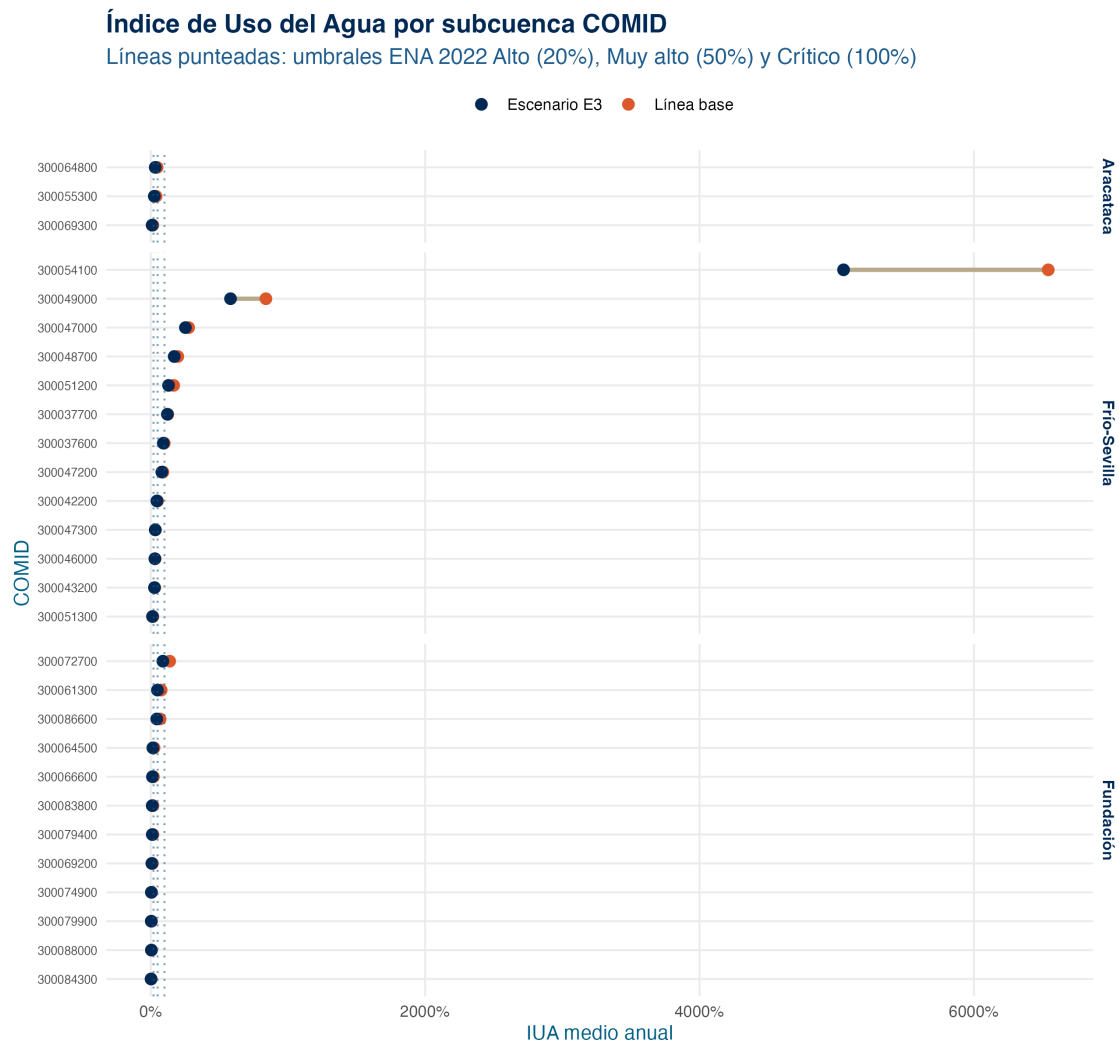


Figura 3: Índice de Uso del Agua medio por subcuenca. Los segmentos conectan el valor de la línea base con el del escenario E3; las líneas punteadas marcan los umbrales Alto, Muy alto y Crítico del ENA 2022. La longitud reducida de los segmentos ilustra la magnitud del cambio alcanzable.

Las subcuencas con mayor presión relativa son las del sistema Frío-Sevilla, con IUA medio en categoría Crítico en 6 de las 13 subcuencas analizadas. Un IUA superior al 100 % indica que la demanda acumulada aguas arriba excede la oferta disponible media en el punto, aun descontando el retorno recuperable, condición que en la práctica es consistente con el aprovechamiento sucesivo de los drenajes más allá de la fracción recuperable adoptada, con el racionamiento efectivo del riego en los meses secos o con el uso de fuentes subterráneas que este balance no contabiliza.

3.3. Comportamiento estacional

Régimen estacional de oferta disponible y demanda por escenario

Área sombreada: oferta disponible media (caudal simulado menos caudal ecológico)

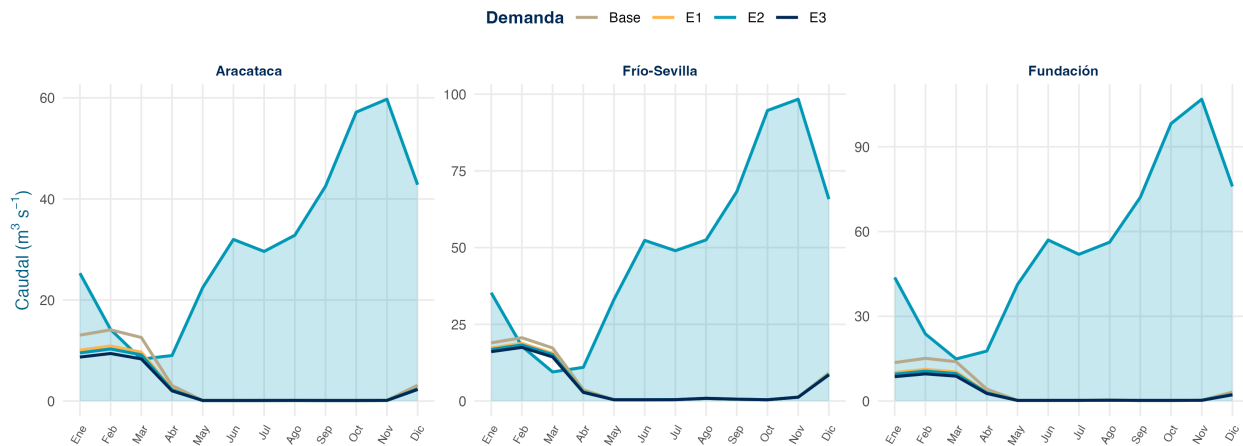


Figura 4: Régimen estacional de oferta disponible y demanda acumulada por escenario, sumando los COMIDs terminales de cada cuenca. La brecha se concentra entre diciembre y abril, cuando la demanda de riego alcanza su máximo y la oferta su mínimo.

La coincidencia entre el máximo de demanda y el mínimo de oferta constituye el rasgo estructural del problema hídrico en estas cuencas. Entre diciembre y abril, el IUA de las cuencas (razón entre demanda media y oferta disponible media) asciende a 46.1 % en Aracataca, 50.0 % en Frío-Sevilla y 28.4 % en Fundación. Bajo el escenario E3, estos valores descienden a 30.9 %, 42.6 % y 18.1 % respectivamente: una mejora perceptible que cambia la categoría de Fundación (de Alto a Moderado) y mantiene la de Aracataca en Alto y Frío-Sevilla en Alto en la temporada seca. En el mes más crítico, marzo, el IUA de la línea base alcanza 152 %, 182 % y 93 % en las tres cuencas, y la probabilidad de déficit en ese mes es de 90 %, 100 % y 95 % de los años.

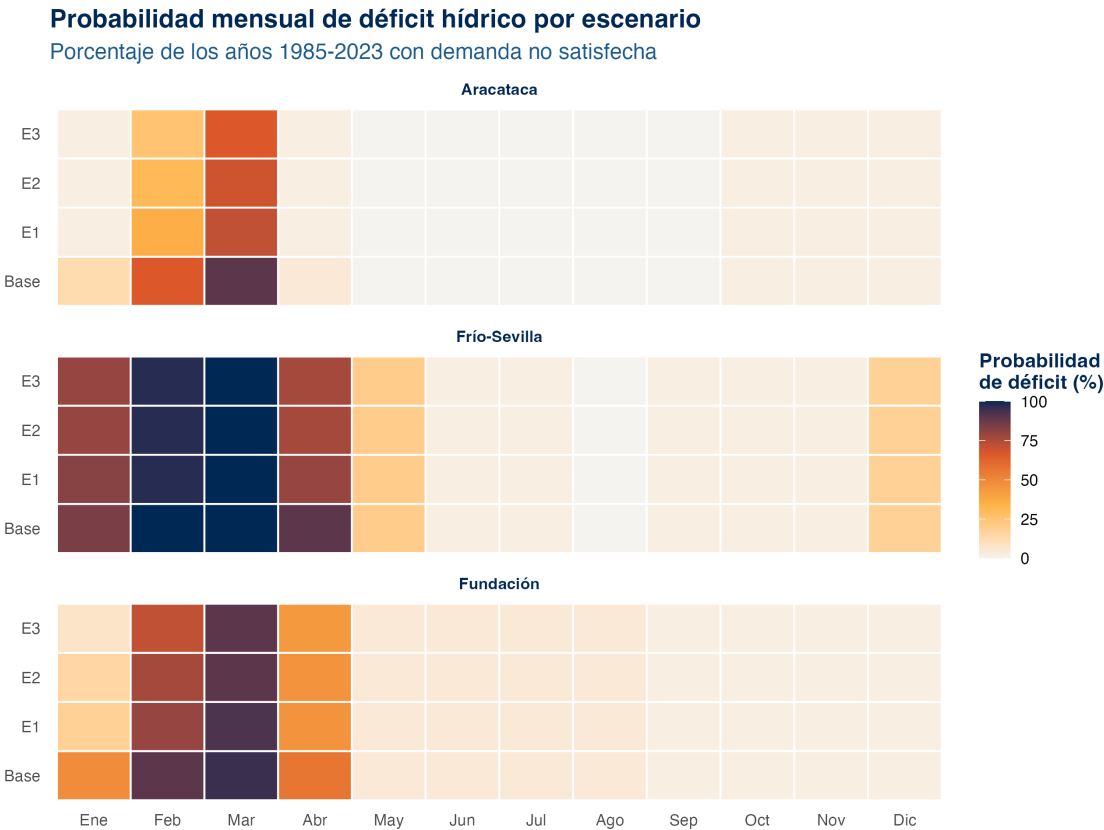


Figura 5: Probabilidad mensual de déficit por escenario, calculada como el porcentaje de los años de 1985 a 2023 con demanda no satisfecha en los COMIDs terminales.

3.4. Impacto bajo condiciones hidrológicas secas

Tabla 2: Balance hídrico bajo el quintil hidrológico más seco del registro de 1985 a 2023 (COMIDs terminales). El IUA es la razón entre la demanda total y la oferta disponible total de la temporada seca (diciembre a abril) de esos años; los meses críticos son los que caen en las categorías Muy alto o Crítico

Cuenca	Escenario	IUA dic. a abr. (%)	Déficit (hm ³ /año)	Meses críticos (% del tiempo)
Aracataca	Base	74.9	45.0	28.1
	E1	58.0	26.7	26.0
	E2	54.9	23.8	25.0
	E3	50.1	19.3	25.0
Frío-Sevilla	Base	77.7	82.7	31.0
	E1	71.0	70.6	29.9
	E2	69.1	67.4	29.7
	E3	66.2	62.4	29.3
Fundación	Base	43.1	32.7	17.7
	E1	32.1	15.4	15.1
	E2	30.3	13.3	14.8
	E3	27.5	10.4	14.1

En los años secos, el escenario E3 reduce el déficit un 57.2 % en Aracataca, un 24.5 % en Frío-Sevilla y un 68.3 % en Fundación. La proporción del tiempo en condiciones críticas cambia menos: desciende del 28.1 % al 25.0 % en Aracataca, del 17.7 % al 14.1 % en Fundación y sólo del 31.0 % al 29.3 % en Frío-Sevilla. Es decir, en la cuenca más crítica los escenarios reducen la *magnitud* del déficit pero apenas su *frecuencia*: los meses que hoy son críticos seguirán siéndolo, aunque con una brecha algo menor.

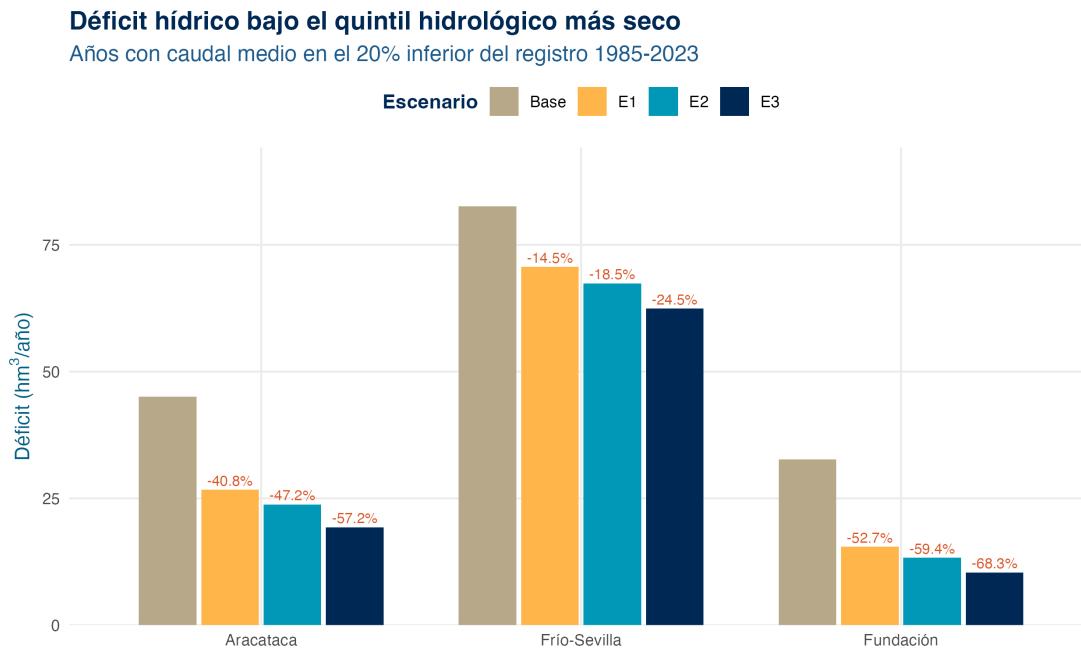


Figura 6: Déficit hídrico bajo el quintil hidrológico más seco. Las etiquetas indican la reducción porcentual respecto a la línea base.

3.5. Caudal recuperado en la red

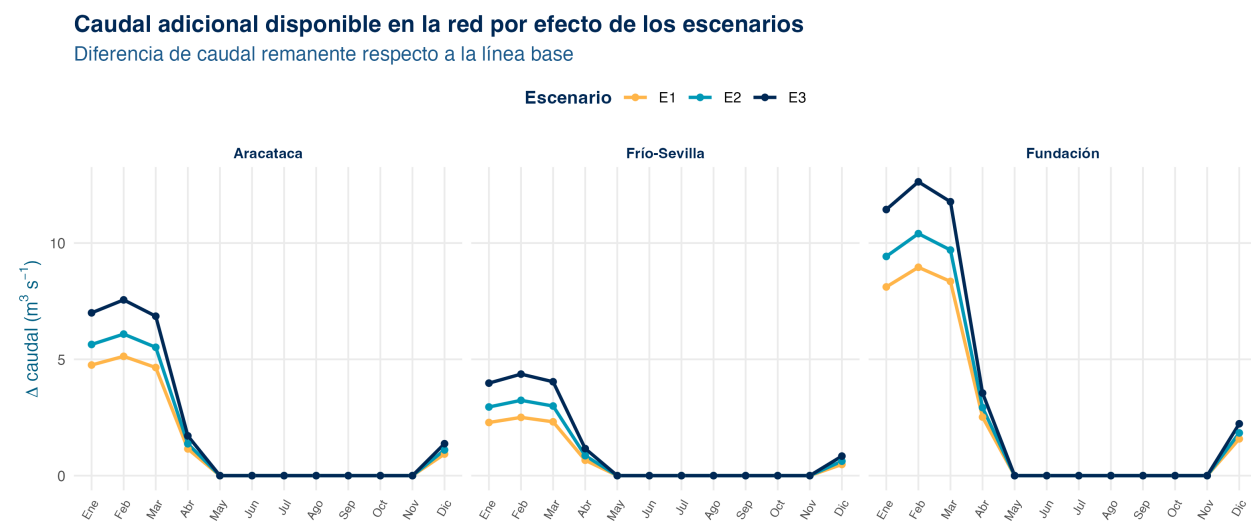


Figura 7: Caudal adicional disponible en la red por efecto de cada escenario, expresado como diferencia respecto al caudal remanente de la línea base.

El caudal adicional que los escenarios devuelven a la red asciende, bajo E3, a 1.263 m³/s en Aracataca, 0.863 m³/s en Frío-Sevilla y 1.507 m³/s en Fundación, totalizando 3.63 m³/s para el conjunto como promedio anual, cifra que coincide con el ahorro real de la actividad 3.2.1. Esta ganancia se concentra en los meses de diciembre a abril, en los que se registra la práctica totalidad de la demanda de riego: promediada sólo sobre esos cinco meses equivale a 8.72 m³/s, por lo que su valor de gestión es superior al que sugiere el promedio anual.

Para dimensionar esta cifra: el déficit remanente que Findeter estima para Tucurínca, Sevilla y Frío tras la optimización del riego es de 7.11 m³/s. Los 3.63 m³/s liberados por el escenario E3 en las tres cuencas del presente estudio equivalen al 51 % de ese déficit remanente, y confirman que la tecnificación del riego, por sí sola, no cierra la brecha. Este contraste no se usó para ajustar ningún parámetro del marco; la fracción recuperable se adopta de la literatura (actividad 3.2.1).

4. Discusión

Los resultados de esta actividad deben leerse conjuntamente con el hallazgo central de la actividad 3.2.1. La reducción del 47.6 % en la captación bruta de riego que produce el escenario E3 es sustancial desde la perspectiva del predio, pero su traducción al balance de cuenca es de un 35.5 % de reducción en la presión efectiva, porque cerca del 50 % del agua ahorrada ya retornaba a la red y seguía disponible aguas abajo.

Conviene distinguir con precisión dos beneficios que suelen confundirse, porque conducen a decisiones de política distintas:

- **Beneficio de redistribución.** Al reducir su captación, el predio situado aguas arriba deja disponible en el tramo un caudal que los usuarios de aguas abajo, hoy estructuralmente deficitarios, alcanzan a captar. No es agua nueva para la cuenca, pero sí permite que un mayor número de usuarios satisfaga su requerimiento con el mismo recurso. Este es el beneficio que capta la reducción del déficit reportada en este documento, de entre 17.3 % y 71.7 % según la cuenca y el escenario.
- **Beneficio de disponibilidad.** Es el volumen que efectivamente se incorpora al sistema porque deja de perderse de forma definitiva. Corresponde a los 3.63 m³/s del escenario E3 y equivale a cerca de 0.50 de cada unidad de agua ahorrada en el predio, la fracción no recuperable del retorno.

Si el objetivo de política es que el sector produzca más y con menor conflicto sobre el mismo recurso, la tecnificación del riego cumple ese propósito. Si el objetivo es cerrar el déficit estructural de las cuencas críticas, no resulta suficiente por sí sola.

Esto no significa que la tecnificación del riego carezca de valor. Sus beneficios documentados son sólidos y de naturaleza distinta a la que el balance agregado captura. El estudio piloto con sensores de humedad en el Campo Experimental Palmar de la Sierra registró una pérdida de biomasa por estrés hídrico en la temporada seca de 1 615 kg de materia seca por hectárea bajo riego superficial, frente a 45 kg bajo aspersión y 6 kg bajo goteo de alto caudal. La tecnificación resuelve un problema de *oportunidad y uniformidad* en la entrega del agua al cultivo, no principalmente un problema de volumen consumido.

Lo que los resultados sí indican con claridad es que la política hídrica regional no puede apoyarse exclusivamente en la mejora de la eficiencia del riego para resolver el déficit de las cuencas críticas. Las subcuencas de Frío-Sevilla en categoría Crítico requieren medidas adicionales: regulación de la oferta mediante almacenamiento, reasignación de concesiones, o reducción efectiva del área bajo riego en los tramos más comprometidos. Esta conclusión coincide con la del estudio

de Findeter y refuerza la pertinencia del escenario E3 del reporte 3.1.2, que incorpora explícitamente medidas de conservación de humedad del suelo dirigidas a estas cuencas.

5. Limitaciones

El análisis mantiene las limitaciones heredadas de la actividad 3.2.1, en particular la incertidumbre sobre el parámetro φ , que gobierna directamente la magnitud de los impactos aquí reportados. La actividad 3.2.3 cuantifica esta sensibilidad.

El balance acumula la demanda a lo largo de la red, pero no enruta los retornos de riego en el tiempo: el retorno se descuenta en el mismo mes y en el mismo COMID donde se genera. Tampoco contabiliza el aporte de aguas subterráneas, que en la Zona Bananera y en los acueductos municipales puede ser relevante; los valores de IUA deben leerse, en consecuencia, como presión sobre la oferta superficial. Finalmente, la demanda doméstica se asigna a cada cuenca por la población que reside dentro de ella y se reparte entre subcuencas de forma proporcional al área, con un perfil mensual uniforme, procedimiento que no captura la localización exacta de las bocatomas de los acueductos.

6. Conclusiones

Los tres escenarios de uso eficiente del agua reducen el déficit hídrico de las cuencas de estudio en proporciones que van del 17.3 % al 71.7 % según la cuenca y el escenario. El escenario E3 libera 3.63 m³/s de caudal adicional para el conjunto de las tres cuencas, concentrados en la temporada seca.

Sin embargo, la categoría Crítico persiste en la mayor parte de las subcuencas que la presentan. De las 7 subcuencas cuyo IUA medio supera el 100 %, 6 en el sistema Frío-Sevilla, 6 permanecen en esa condición bajo el escenario más ambicioso y sólo 300072700 (Fundación) desciende a Muy alto. La mejora de la eficiencia del riego reduce la magnitud del déficit más que su frecuencia y su distribución espacial.

Estos resultados reproducen de forma independiente el diagnóstico de Findeter según el cual las cuencas de Sevilla, Frío y Tucurínca mantienen déficit remanente aun tras la optimización del riego, y confirman la necesidad de complementar las tecnologías de UEA con estrategias adicionales de gestión de la oferta y la demanda en las cuencas de mayor vulnerabilidad.

7. Productos generados

Tabla 3: Archivos generados por la actividad 3.2.2

Archivo	Contenido
analisis_322.R	Construcción del balance hídrico, contraste cruzado con 2.3.3 y clasificación de vulnerabilidad
figuras_322.R	Generación de las siete figuras del reporte
iua_vulnerabilidad_escenarios.parquet	IUA y vulnerabilidad por COMID y escenario
balance_estacional_escenarios.parquet	Perfil estacional de oferta, demanda y déficit por cuenca
caudal_recuperado_escenarios.parquet	Caudal adicional por COMID, mes y escenario
balance_cuenca_escenarios.csv	Resumen del balance por cuenca

Referencias

- Delgado, T. (2026). *Definición de escenarios de mejora de prácticas de aprovechamiento óptimo del recurso hídrico*. Reporte de actividad 3.1.2, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.
- Delgado, T., Ladino, G., Zapata, A., & Arias, N. (2024). *Principios básicos para el manejo eficiente del riego en el cultivo de palma de aceite* (Boletín Técnico 47). Cenipalma.
- Demmink, L., Lugtenburg, C., Kaune, A., Goretti, M., Pérez, C., Delgado, T., & Arias, N. A. (2021). *Increasing water efficiency in Colombian palm oil production by implementing efficient irrigation systems. Final report*. Delphy, FutureWater, Solidaridad, Cenipalma.
- Findeter, Asbama, Fedepalma. (2017-2018). *Diagnóstico hídrico para soluciones multipropósito en la región centro y norte del departamento del Magdalena. Agua para la Paz*.
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. *Hoja metodológica del indicador Índice de uso del agua (IUA), versión 1.3*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- 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.
- Zabala, A., & Bojacá, C. R. (2026). *Zonas críticas de vulnerabilidad hídrica*. Reporte de actividad 2.3.3, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.