
Reporte de Actividad 2.3.3

Zonas críticas de vulnerabilidad hídrica

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 2.3.3 constituye la síntesis del análisis de disponibilidad hídrica: integra los resultados espaciales de la actividad 2.3.1 (oferta neta por subcuenca) con los temporales de la actividad 2.3.2 (régimen estacional y variabilidad interanual) y los cruza con las demandas sectoriales cuantificadas en el objetivo 1 del proyecto.

El propósito central es responder a la pregunta: **¿en qué zonas y en qué períodos la disponibilidad hídrica es insuficiente frente a la demanda?** Para ello se adopta el marco del Estudio Nacional del Agua (ENA 2022) del IDEAM, que clasifica la presión sobre el recurso hídrico mediante el Índice de Uso del Agua (IUA), definido como la relación entre la demanda y la oferta hídrica disponible.

2. Metodología

2.1. Alcance y supuestos

- La demanda se estima para los 54 COMIDs del dominio de modelación y se acumula aguas arriba de cada COMID estratégico, de modo que se compara con el caudal enrutado que el modelo simula en ese punto. Los totales por cuenca se calculan sólo con los COMIDs terminales (actividad 2.3.1).
- La demanda no incluye un sector “ecológico”: el caudal ecológico (Resolución 865 de 2004, 25 % del caudal medio mensual multianual más bajo de cada COMID) se descuenta de la oferta.
- Demanda doméstica del año 2024, asignada a cada cuenca por la población que reside dentro de ella (cabeceras y centros poblados) y repartida entre sus COMIDs por área local; demandas de palma de aceite y banano por intersección de la cobertura Corine Land Cover con cada COMID, promediando los años 2018, 2020 y 2022. El perfil mensual es el del balance hídrico de la fuente de cada cultivo.
- Las demandas provienen del RAS y las proyecciones del DANE (doméstico), de la zonificación agroclimática de Cenipalma con evapotranspiración de referencia PALMET, método FAO-56 Penman-Monteith (palma) y de un balance hídrico con datos PALMET (banano); no son concesiones de la autoridad ambiental.
- La demanda de palma que entra al balance, al IUA y a la vulnerabilidad es la **demanda neta** del retorno recuperable: de la captación bruta se descuenta la fracción $\varphi = 0.50$ del agua captada y no consumida que vuelve a la red superficial o al acuífero dulce y sigue disponible aguas abajo. El valor de φ se adopta de la literatura de contabilidad del agua de riego, con banda de incertidumbre de 0.40 a 0.65. Banano y plátano y la demanda doméstica entran como demanda bruta.
- El IUA es superficial: no descuenta el uso de aguas subterráneas ni el almacenamiento, y el retorno recuperable de palma se descuenta en el mismo mes y COMID donde se genera, sin enrutarlo en el tiempo. Se usa la escala del ENA 2022 (hoja metodológica IUA v1.3 del IDEAM).

2.2. Demanda por COMID

La demanda anual de cada sector se distribuye a escala mensual y de COMID, en m^3/mes , para los 54 COMIDs de las tres cuencas. La demanda que ejerce presión sobre el caudal en

un punto es la suma de la demanda local del COMID y la de todos los COMIDs situados aguas arriba (demanda acumulada, $D_{i,m}^{acum}$), reconstruida con la topología de la red del modelo. El perfil estacional resultante concentra el 96 % de la demanda anual entre diciembre y abril, con un peso relativo máximo en febrero y mínimo en mayo. La Tabla 1 resume la demanda anual por cuenca y sector.

La demanda de palma se expresa como demanda neta del retorno recuperable. Del agua captada para riego, W , el cultivo consume la fracción E_{base} , la eficiencia de riego con la que se calculó la demanda bruta (0.39 en Frío-Sevilla y 0.32 en Aracataca-Tucurín y Fundación); el resto, $(1 - E_{base}) W$, retorna. Una fracción φ de ese retorno vuelve a la red superficial o al acuífero dulce y sigue disponible aguas abajo, y el complemento $1 - \varphi$ no es recuperable (drenaje al sistema cenagoso, percolación a acuíferos salobres, evaporación no benéfica). La demanda neta de palma por COMID y mes es

$$N_{i,m}^{palma} = W_{i,m} - \varphi_i (1 - E_{base,i,m}) W_{i,m} \quad (1)$$

El valor adoptado, $\varphi = 0.50$, se apoya en la revisión de la FAO sobre el reúso del agua en sistemas agrícolas (Van Opstal et al., 2025), según la cual el retorno de riego representa típicamente entre el 30 % y el 50 % de lo captado, con un promedio del 35 %, que con las eficiencias de línea base de las cuencas equivale a φ de 0.51 a 0.57; en el caso de aplicación de la herramienta REWAS de la FAO y FutureWater a escala de sistema (Whiting et al., 2023); y en la cota superior cercana a 0.6 que Grafton et al. (2018) reportan para riego superficial. Se aplica con un gradiente moderado por zona longitudinal (mayor en la parte alta, menor en la baja) normalizado para conservar la media ponderada. El mismo valor rige la línea base de los escenarios de uso eficiente del agua de la actividad 3.2. En conjunto, el retorno recuperable descontado asciende a 158.7 hm³/año, de modo que la demanda neta de palma, 322.8 hm³/año, es el 67 % de la captación bruta.

Tabla 1: Demanda hídrica anual por cuenca y sector (hm³/año), sumada sobre los COMIDs de cada cuenca. Palma y banano: promedio de los años 2018, 2020 y 2022; doméstico: año 2024. La palma se muestra como captación bruta y como demanda neta del retorno recuperable ($\varphi = 0.50$); el total y la participación de la palma usan la demanda neta, que es la que entra al balance.

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 %

2.3. Balance hídrico mensual

El balance se calcula para cada COMID estratégico, mes y año del período 1985 a 2023. La oferta disponible es el caudal medio del mes simulado por HydroBID menos el caudal ecológico constante del COMID (actividad 2.3.1), con un mínimo de cero:

$$Q_{i,a,m}^{disp} = \max(Q_{i,a,m} - Q_i^{eco}, 0), \quad B_{i,a,m} = Q_{i,a,m}^{disp} - D_{i,m}^{acum} \quad (2)$$

El déficit es la parte negativa del balance y se acumula en volumen anual. En 124 de los 13 104 meses simulados el caudal del mes queda por debajo del caudal ecológico y la oferta disponible es cero.

2.4. Índice de Uso del Agua (IUA)

El IUA se calcula como lo define la hoja metodológica del IDEAM para el ENA 2022: la relación porcentual entre la demanda y la oferta hídrica disponible (descontado el caudal ambiental):

$$IUA_{i,a,m} = \frac{D_{i,m}^{acum}}{Q_{i,a,m}^{disp}} \times 100 \quad (3)$$

Cuando la oferta disponible es cero el índice no está definido y se clasifica en la categoría más alta. Las categorías del ENA 2022 son:

Categoría	Rango del IUA (%)
Muy bajo	≤ 1
Bajo	1 a 10
Moderado	10 a 20
Alto	20 a 50
Muy alto	50 a 100
Crítico	> 100

Un IUA superior a 100 % (categoría Crítico) equivale a un balance negativo: la demanda acumulada supera la oferta disponible del mes. El IUA de una cuenca en un mes se calcula como la razón entre la demanda media multianual y la oferta disponible media multianual, sumando ambas sobre los COMIDs terminales.

2.5. Clasificación de vulnerabilidad

Cada COMID se clasifica según el número promedio de meses por año en que el IUA supera el 50 % (categorías Muy alto y Crítico):

- **Sin presión alta:** ningún mes.
- **Baja:** hasta 1 mes promedio por año.
- **Moderada:** más de 1 y hasta 3 meses.
- **Alta:** más de 3 y hasta 6 meses.
- **Muy alta:** más de 6 meses.

3. Resultados

3.1. Balance hídrico mensual por cuenca

La Figura 1 presenta el balance mensual promedio de cada cuenca, sumando la oferta disponible y la demanda acumulada de sus COMIDs terminales. El déficit se presenta en marzo en Aracataca y en febrero y marzo en Frío-Sevilla, cuando coinciden el estiaje y la máxima demanda de riego; el resto del año el balance es positivo. El mes más desfavorable es marzo en Aracataca y Frío-Sevilla, con un balance promedio de $-4.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en Aracataca y $-7.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en Frío-Sevilla. Fundación no presenta balance medio negativo en ningún mes; su mínimo es de $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo.

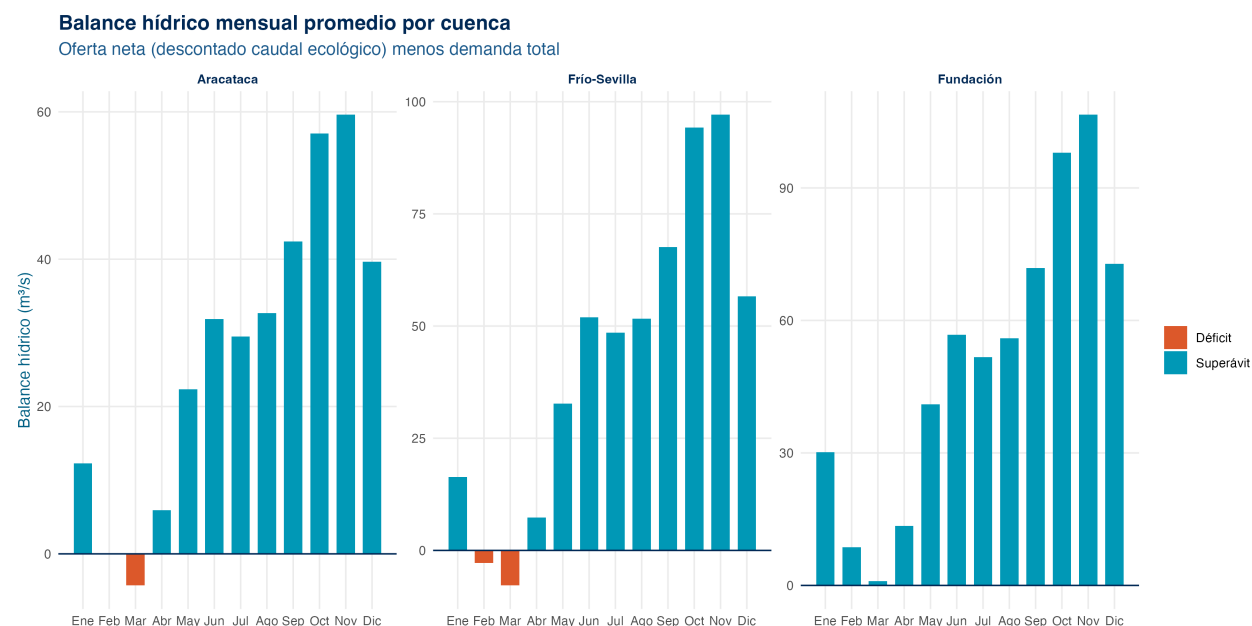


Figura 1: Balance hídrico mensual promedio por cuenca, sumando los COMIDs terminales: oferta disponible (caudal del mes menos caudal ecológico) menos demanda acumulada. Superávit en azul y déficit en naranja. Período 1985 a 2023.

3.2. Índice de Uso del Agua: magnitud y distribución espacio-temporal

La Tabla 2 presenta el IUA mensual de cada cuenca. La categoría Crítico, en la que la demanda acumulada supera la oferta disponible, se alcanza en marzo en Aracataca y en febrero y marzo en Frío-Sevilla. El máximo se alcanza en marzo, con 152 % en Aracataca, 182 % en Frío-Sevilla y 93 % en Fundación, es decir, una demanda de 0.9 a 1.8 veces la oferta disponible. Entre mayo y noviembre, en cambio, el IUA de cuenca cae a las categorías Muy bajo a Bajo, y diciembre queda en Bajo en Aracataca y Fundación y Moderado en Frío-Sevilla. La presión es, por tanto, estacional y de gran magnitud en el estiaje, no permanente. En la banda de incertidumbre de la fracción recuperable, el IUA máximo mensual de cuenca va de 130 % a 166 % en Aracataca, de 169 % a 191 % en Frío-Sevilla y de 80 % a 102 % en Fundación; la categoría Crítico se alcanza en algún mes en Aracataca, Frío-Sevilla y Fundación con $\varphi = 0.40$, en Aracataca y Frío-Sevilla con el valor adoptado y en Aracataca y Frío-Sevilla con $\varphi = 0.65$.

Tabla 2: IUA mensual por cuenca (%), calculado como razón de medias multianuales sumando los COMIDs terminales. Valores mayores que 100 (Crítico) indican que la demanda acumulada supera la oferta disponible. En oct en Aracataca, nov en Aracataca, dic en Aracataca, nov en Frío-Sevilla, dic en Frío-Sevilla, nov en Fundación y dic en Fundación 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

Al examinar la distribución a nivel de subcuenca (Figura 2) se aprecia que la presión no es homogénea dentro de cada cuenca: los COMIDs con poco caudal propio y mucha demanda acumu-

lada concentran valores de IUA extremos, mientras que los COMIDs de mayor caudal mantienen niveles moderados en los mismos meses.

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

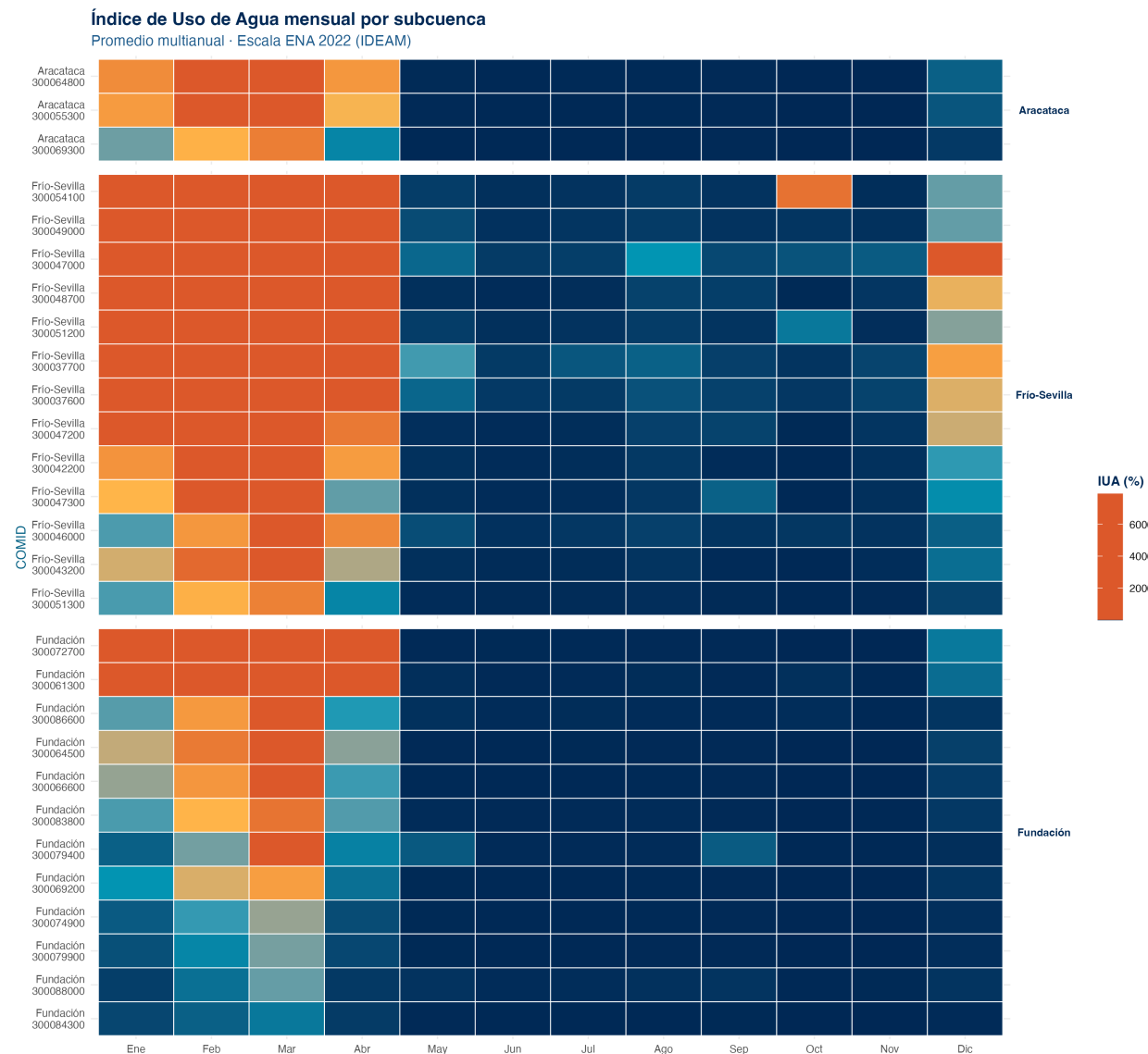


Figura 2: Índice de Uso del Agua mensual por subcuenca (promedio multianual de los meses con oferta disponible). Colores cálidos: categorías Muy alto y Crítico (IUA mayor que 50 %). Escala ENA 2022.

3.3. Clasificación de vulnerabilidad hídrica

La clasificación por número de meses con IUA superior al 50 % se resume en la Tabla 3: de los 28 COMIDs, **12 (43 %) se clasifican en vulnerabilidad Alta o Muy alta**, ninguno en Muy alta; 6 COMIDs quedan en Baja y 0 sin déficit.

Tabla 3: Distribución de COMIDs 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

Frío-Sevilla es la cuenca más comprometida, con 9 de sus 13 COMIDs en Alta o Muy alta. Fundación tiene 2 de 12 en esas categorías y concentra los COMIDs de vulnerabilidad Baja; los 3 COMIDs de Aracataca se reparten así: 2 en Moderada y 1 en Alta. Ningún COMID escapa por completo al déficit estacional. La Figura 3 muestra la distribución espacial de la clasificación.

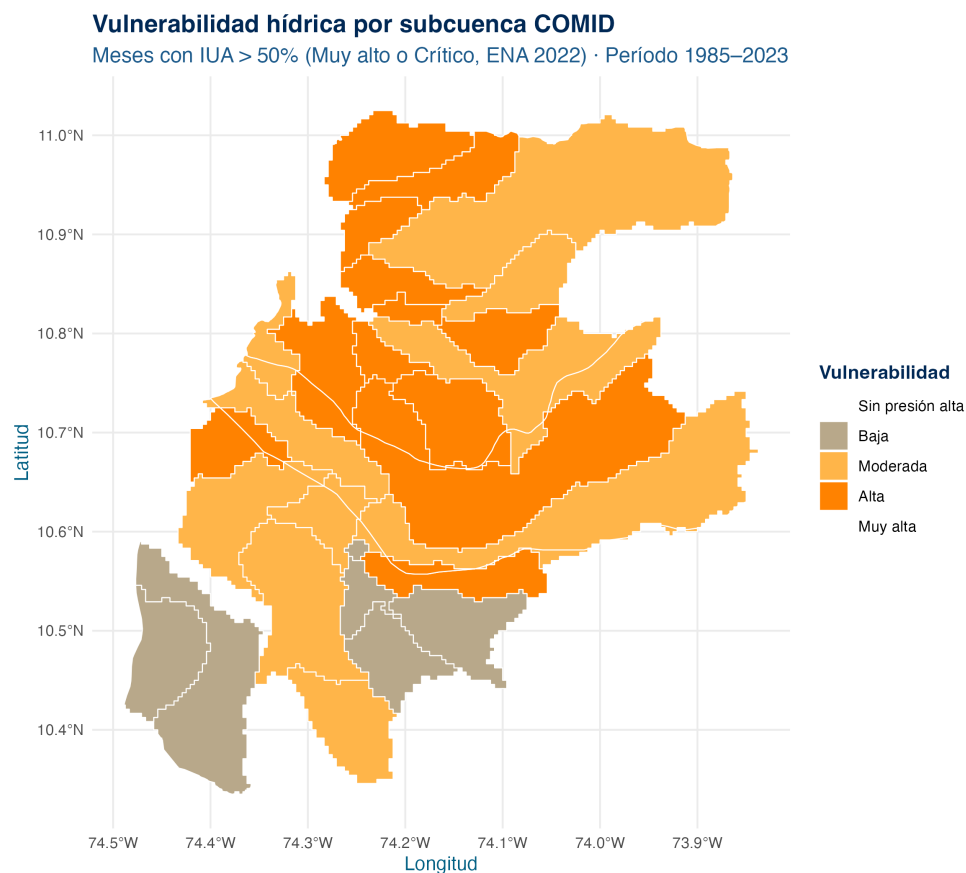


Figura 3: Vulnerabilidad hídrica por subcuenca COMID según el número de meses al año con IUA superior al 50 % (categorías Muy alto y Crítico del ENA 2022). Período 1985 a 2023.

3.4. Cuantificación del déficit volumétrico

El déficit de cada COMID es el volumen anual promedio en que la demanda acumulada supera la oferta disponible en ese punto. Como la demanda se acumula aguas arriba, el déficit del COMID de salida de una cuenca ya contiene el de las subcuencas que drenan a él; por eso el déficit de la cuenca se obtiene sumando sólo los COMIDs terminales. Con ese criterio el déficit asciende a **95**

hm³/año en las tres cuencas: 61 hm³/año en Frío-Sevilla (64 %), 22 en Aracataca (23 %) y 13 en Fundación (14 %).

Estas cifras dependen de la fracción recuperable adoptada. En su banda de incertidumbre, el déficit total varía entre 76 hm³/año con $\varphi = 0.65$ y 110 hm³/año con $\varphi = 0.40$: de 53 a 66 en Frío-Sevilla, de 14 a 27 en Aracataca y de 9 a 16 en Fundación. Frío-Sevilla concentra la mayor parte del déficit en todo el rango.

La Figura 4 ordena los COMIDs por déficit individual. Los tres mayores son 300055300 (Aracataca, 22 hm³/año), 300051200 (Frío-Sevilla, 18) y 300049000 (Frío-Sevilla, 16); como la demanda se acumula aguas arriba, el déficit de cada uno incluye el de su red tributaria.

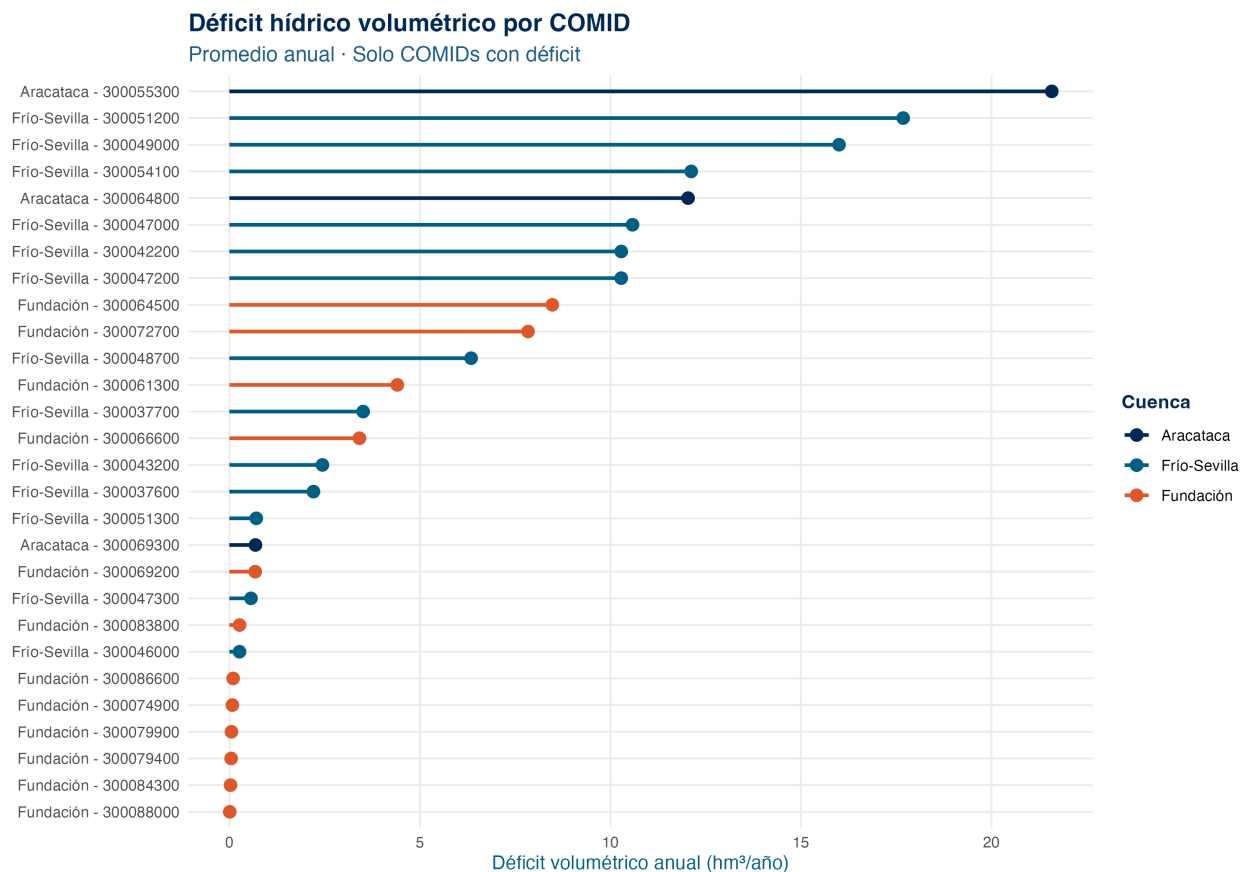


Figura 4: Déficit volumétrico anual promedio (hm³/año) por COMID, ordenado por magnitud. El déficit de un COMID incluye el de los COMIDs aguas arriba, por lo que los valores no se suman entre COMIDs anidados.

3.5. Período crítico: estiaje y riesgo para la palma de aceite

La Figura 5 detalla la distribución del IUA de los COMIDs durante los cuatro meses de estiaje (diciembre a marzo). Sobre el conjunto de COMIDs de cada cuenca, la mediana del IUA supera el 100 % en febrero y marzo en Aracataca y Frío-Sevilla, y no lo supera en ningún mes en Fundación; diciembre queda por debajo en las tres. La dispersión entre años es amplia, sobre todo en Frío-Sevilla y Fundación, lo que refleja que la severidad del déficit depende fuertemente de las condiciones climáticas del año (actividad 2.3.2).

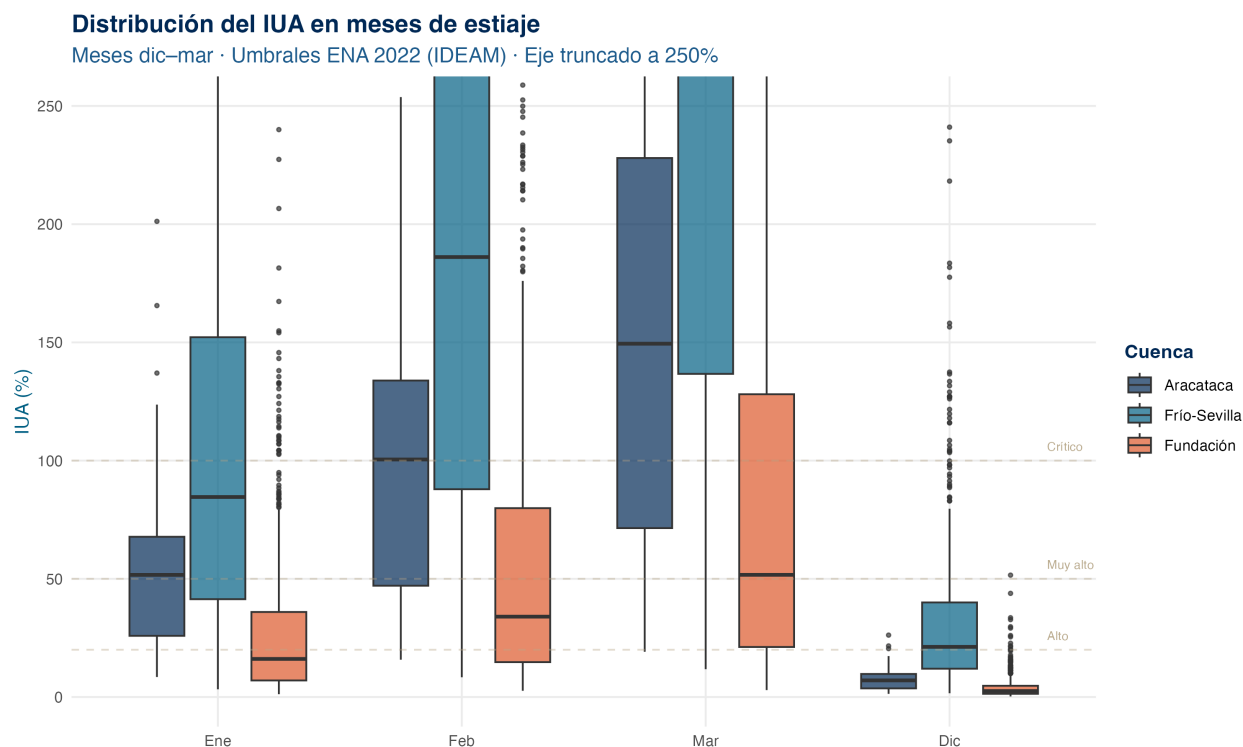


Figura 5: Distribución del IUA mensual de los COMIDs estratégicos durante el estiaje (diciembre a marzo), por cuenca. Las líneas horizontales marcan los umbrales de las categorías Alto, Muy alto y Crítico del ENA 2022. Eje truncado a 250 % para visualización.

La coincidencia entre el período de máxima presión hídrica (febrero y marzo) y la fase fenológica de la palma de aceite de mayor requerimiento de agua, previa a la cosecha principal de abril a junio, configura un riesgo agronómico estructural. En las subcuencas de vulnerabilidad Alta la demanda acumulada supera la mitad de la oferta superficial disponible durante más de tres y hasta seis meses al año en promedio, lo que obliga a considerar fuentes alternativas, almacenamiento estacional o cambios en las estrategias de riego.

4. Conclusiones

- El balance hídrico mensual muestra un déficit estacional en marzo en Aracataca y en febrero y marzo en Frío-Sevilla, con marzo en Aracataca y Frío-Sevilla como mes más crítico. El resto del año la oferta disponible supera la demanda acumulada.
- El Índice de Uso del Agua de cuenca alcanza en marzo valores de 152 % en Aracataca, 182 % en Frío-Sevilla y 93 % en Fundación (categoría Crítico en Aracataca y Frío-Sevilla y Muy alto en Fundación del ENA 2022), mientras que entre mayo y noviembre desciende a las categorías Muy bajo a Bajo.
- De los 28 COMIDs estratégicos, 12 (43 %) presentan vulnerabilidad Alta o Muy alta. El déficit volumétrico, sumando los COMIDs terminales, es de 95 hm³/año: 61 en Frío-Sevilla, 22 en Aracataca y 13 en Fundación. En la banda de incertidumbre de la fracción recuperable, de 0.40 a 0.65, el déficit total varía entre 76 y 110 hm³/año.
- La vulnerabilidad es de naturaleza **estructural** en el estiaje: se presenta con caudales medios y se agrava en años El Niño. Las cifras describen la presión sobre la oferta

superficial natural con la demanda neta de palma, sin descontar aguas subterráneas ni almacenamiento; las actividades del objetivo 3 evalúan cuánto de esta brecha puede reducirse mediante escenarios de uso eficiente del agua.

- Los resultados identifican, con resolución de subcuenca y de mes, los sitios y períodos donde la gestión del recurso es prioritaria para la sostenibilidad del cultivo de palma de aceite en la Zona Norte.

Referencias

- 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.
- 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.
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá.
- IDEAM. *Hoja metodológica del indicador Índice de Uso del Agua (IUA), versión 1.3*. Sistema de Información Ambiental de Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 330 de 2017, Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*.
- 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., Turrall, H., & Droogers, P. (2023). *Real water savings in agriculture*. Next Generation Water Management Policy Briefs 1. FAO, Bangkok.
- Zabala, A., & Bojacá, C. R. (2026). *Distribución espacial de la disponibilidad hídrica*. Reporte de actividad 2.3.1, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.