

Riesgo hidroclimático y de inundación — Machala

Estación INAMHI M0072 · Sitio -3.2650, -79.9720 · WGS84 / UTM (EPSG:32717)

1. Resumen ejecutivo

Se delimitó una **carta = ventana de 0,05° centrada en el sitio (30,7 km²)** sobre el sitio y se analizó: hidrología HEC-HMS, inundación por HAND, 2D inercial sobre FABDEM, 34 modelos CMIP6 con corrección de sesgo, ENSO, GEI. El paquete HEC-RAS 2D queda listo para la corrida oficial.

30,7 km²

Carta 0,05° centrada en el sitio

996 m

Estación de referencia M0072 al sitio

+16%

Factor IDF de diseño

489 m³/s

Caudal pico Tr100 +CC

0,6 m

Calado p99 2D (FABDEM)

20,7 km²

Área inundada Tr100 (68%)

97,1 km

Vías afectadas Tr100+CC

+9,9%

Precip. anual SSP5-8.5 (ensamble)

34

Modelos CMIP6 evaluados

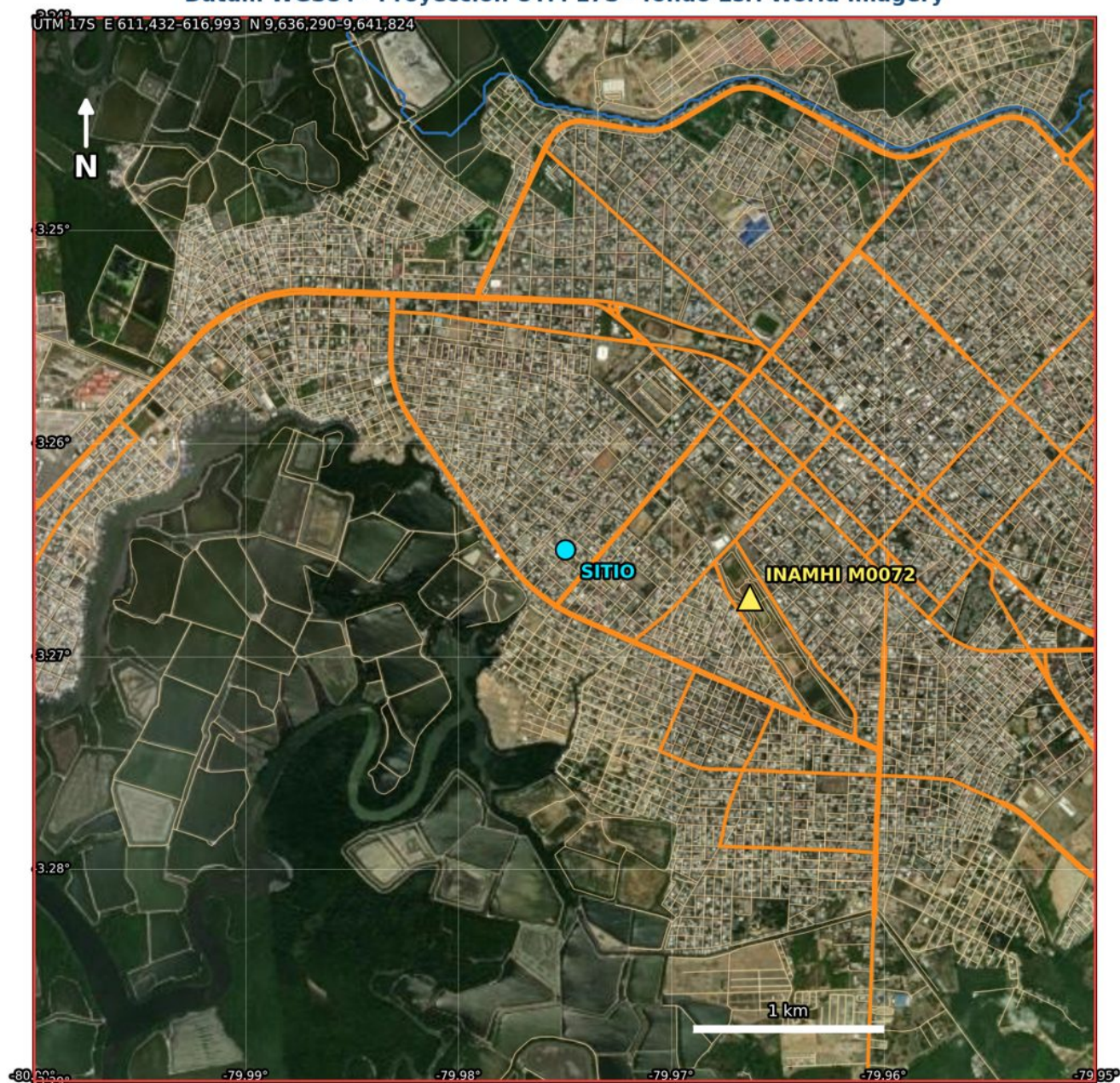
94%

Agua JRC contenida por el modelo

2. Zona y estación de referencia

La estación INAMHI de referencia M0072 (Machala Aeropuerto) está a 996 m del sitio (-3.2650, -79.9720). CHIRPS (0,05° ≈ 5,5 km) no resuelve la variabilidad dentro de la ciudad. El diseño puntual usa la tabla de la estación (mismo pixel CHIRPS).

CARTA TOPOGRÁFICA — Zona Machala · ventana 0,05° centrada en el sitio (≈ 5,5 km · 30.7 km²)
Datum WGS84 · Proyección UTM 17S · fondo Esri World Imagery



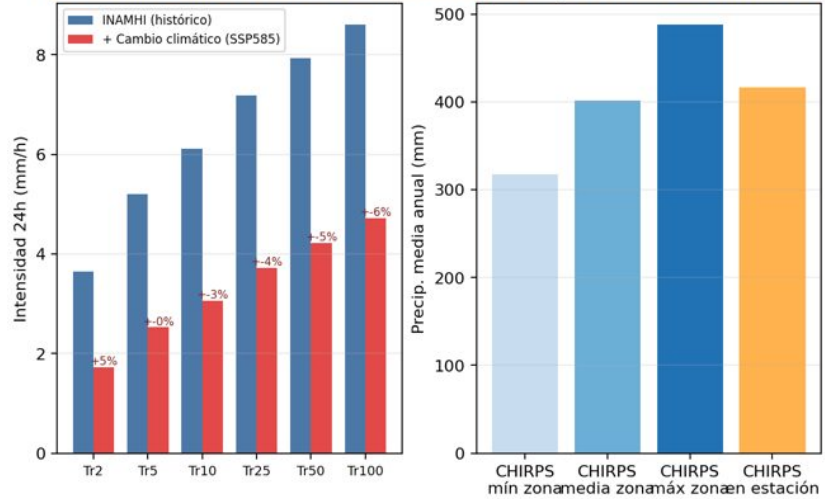
Carta topográfica (ventana 0,05° centrada en el sitio) — grilla UTM, red vial OSM, estación y sitio.

Contraste estación INAMHI vs productos hidroclima — zona Machala

Estacion INAMHI M0072 vs sitio (996 m)



IDF estación M0072: histórico vs futuro (CHIRPS) en la zona — estación 46 m s.n.m.



INAMHI M0072: MACHALA AEROPUERTO · -3.2672, -79.9633 · 4 m

Contraste estación INAMHI M0072 vs sitio: ubicación, IDF y precipitación.

Sitio del proyecto: Ciudadelas Machala y Emeloro (centroide APROXIMADO)

Coordenadas -3.26500, -79.97200 (UTM 17S 614,212 / 9,639,057). Lectura puntual de los resultados en el sitio.

7,8 m

Cota FABDEM en el sitio
(suelo desnudo)

2.352 m

Distancia al cauce
(merge DEM +
GEOGLOWS)

7,8 m

Altura del sitio sobre el
cauce más cercano

Preliminar

Nivel de confianza del
2D

Escenario	Calado en el sitio	Máx. en 60 m	Máx. en 120 m
Tr 25 (+CC)	0,04 m	0,06 m	0,09 m
Tr 50 (+CC)	0,04 m	0,06 m	0,11 m
Tr 100 (+CC)	0,05 m	0,07 m	0,13 m

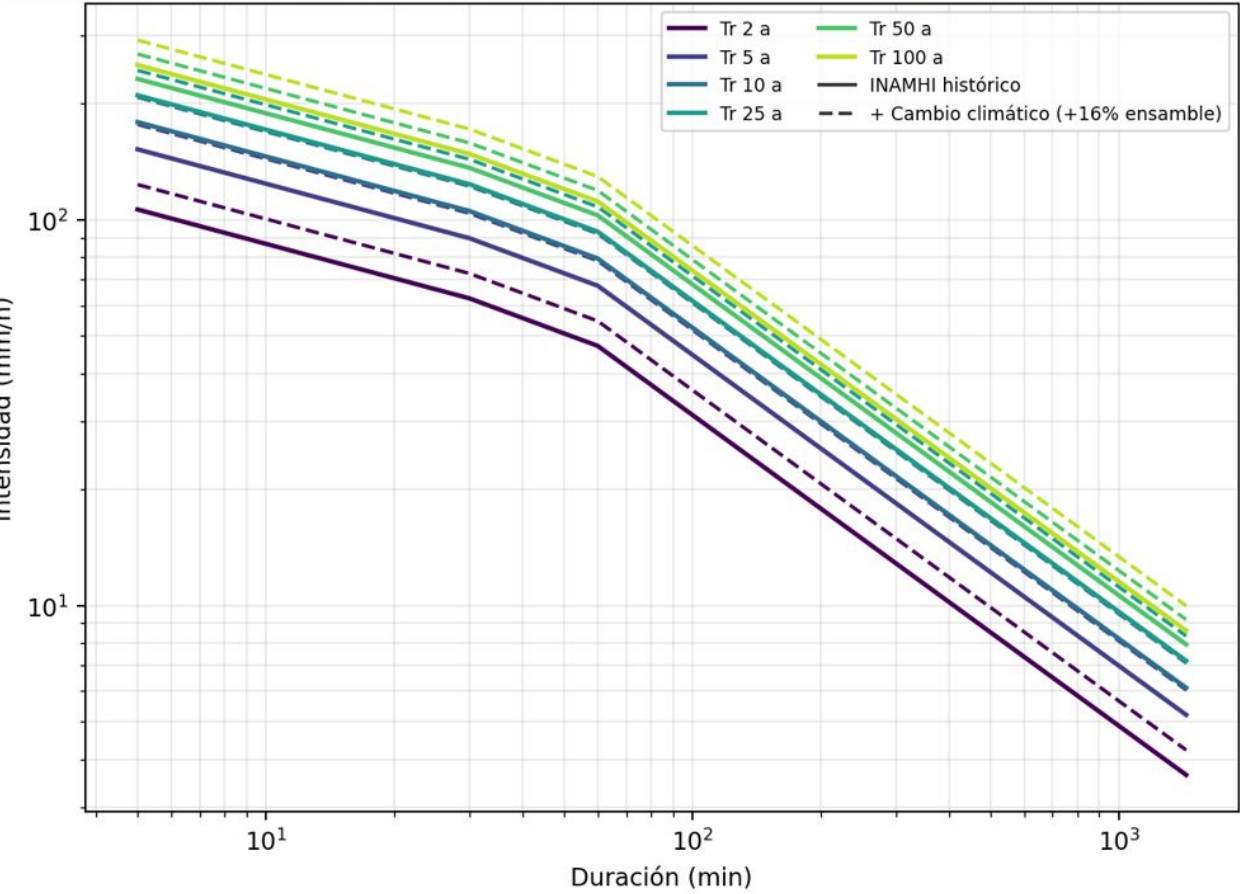
El 2D preliminar **no muestra afectación fluvial** en el sitio: el calado dentro de 120 m es menor de 0,3 m y proviene de la lluvia sobre la malla (escorrentía laminar), no del desborde del río. FABDEM tiene un error vertical de unos $\pm 3-5$ m: la cota del sitio debe contrastarse con el levantamiento topográfico del proyecto.

3. Curvas IDF y cambio climático

Método: IDF del libro INAMHI ($i = K \cdot Idtr \cdot t^{-n}$, zona y $Idtr$ de la estación/sitio). Factor de diseño **+16%**: se toma del **ensamble ponderado ClimWIP (SSP5-8.5)**, no de un solo modelo con corrección de sesgo EQM, que amplifica los extremos (Maraun 2013).

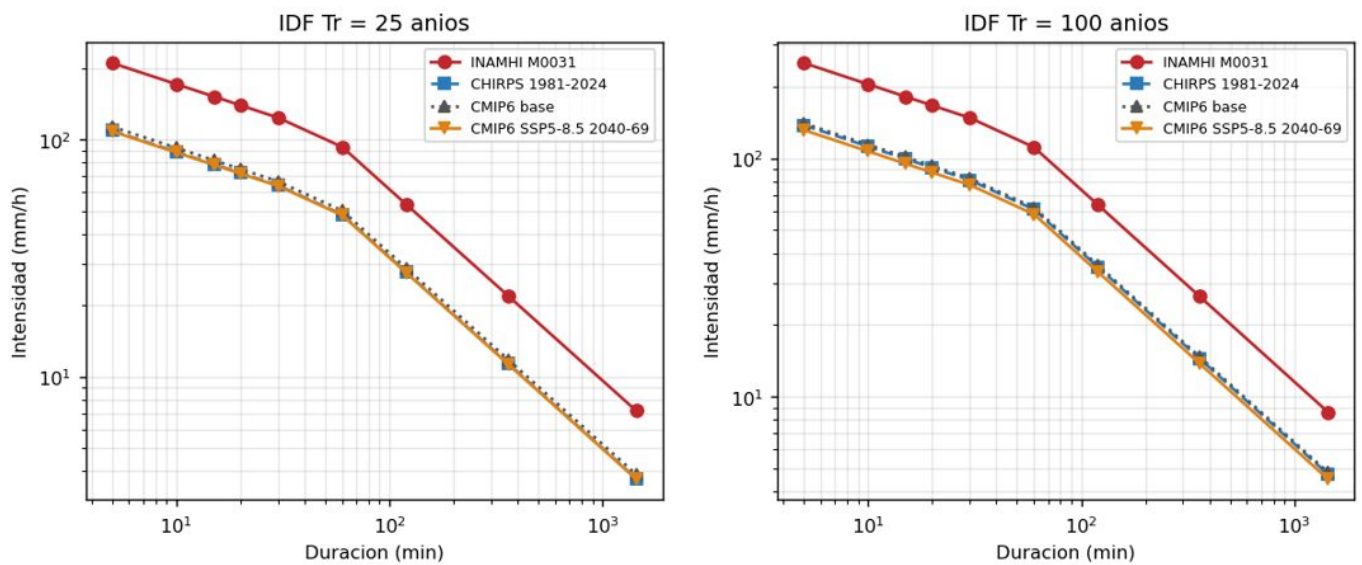
Escenario	Ensamble ponderado (ClimWIP)	Media simple	Rango P10–P90	Modelo único
SSP2-4.5	+6,1%	+11,9%	[-4.5, +22.0]	-4,9%
SSP5-8.5	+9,9%	+17,1%	[-1.8, +28.8]	-3,3%

Curvas IDF estación INAMHI M0072 — histórico vs cambio climático (SSP5-8.5, factor de ensamble ClimWIP +16%; línea sólida = histórico, discontinua = futuro)



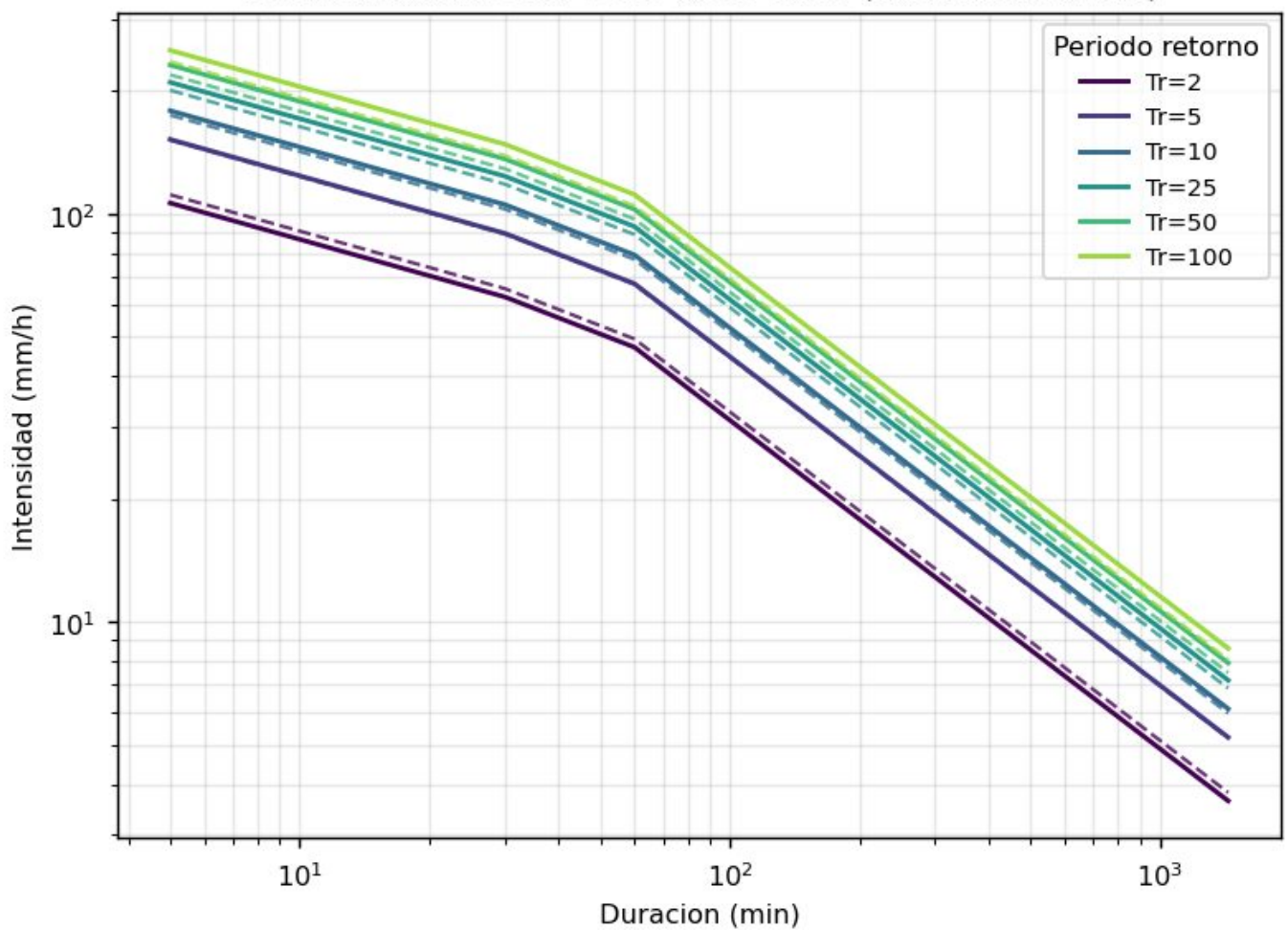
Curvas IDF estación M0072 — histórico (sólida) vs cambio climático +16% (discontinua).

Curvas IDF estacion Machala (M0031) — INAMHI vs CHIRPS vs CMIP6



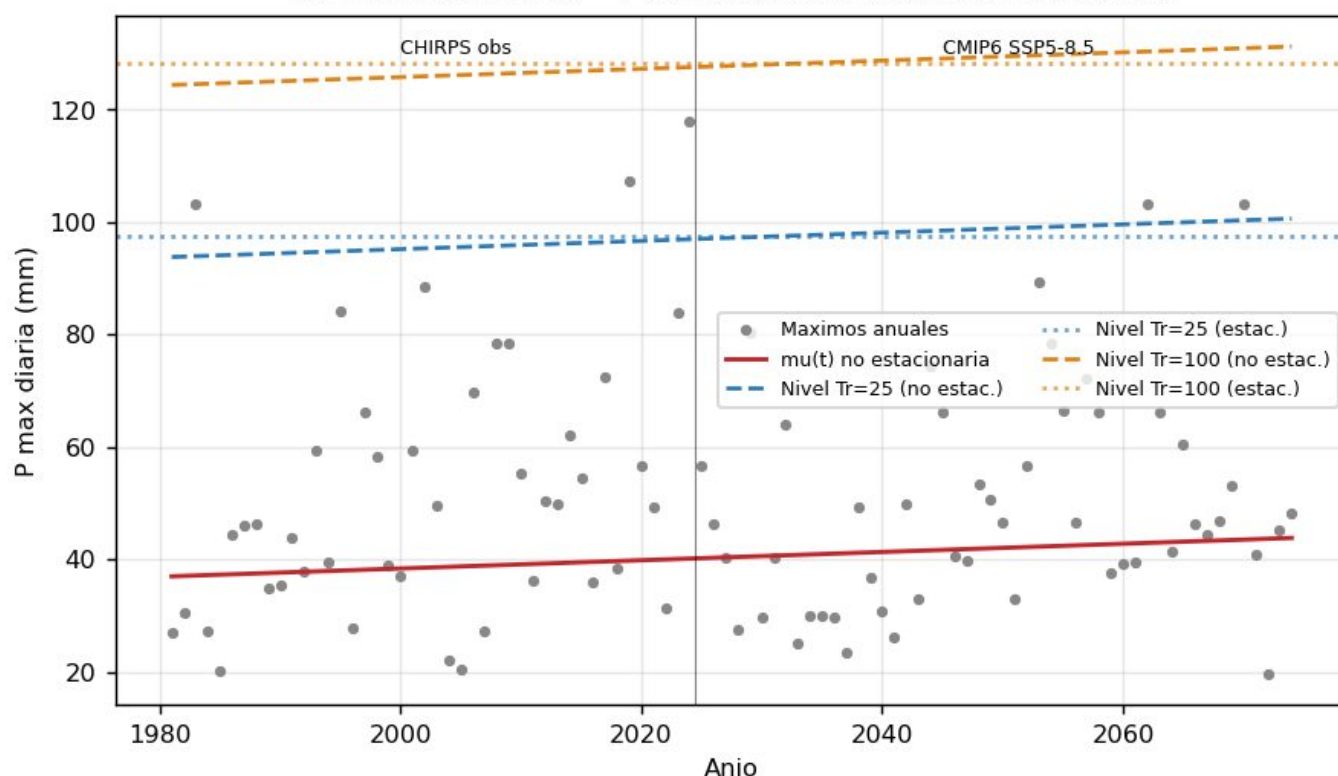
IDF: INAMHI observado vs CHIRPS vs CMIP6.

IDF INAMHI M0031 (línea continua) y ajustada por cambio climático SSP5-8.5 2040-2069 (línea discontinua)



IDF INAMHI ajustada por cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5).

IDF no estacionaria — P24h de diseno creciente 1981-2069



IDF no estacionaria (GEV con $\mu(t)$).

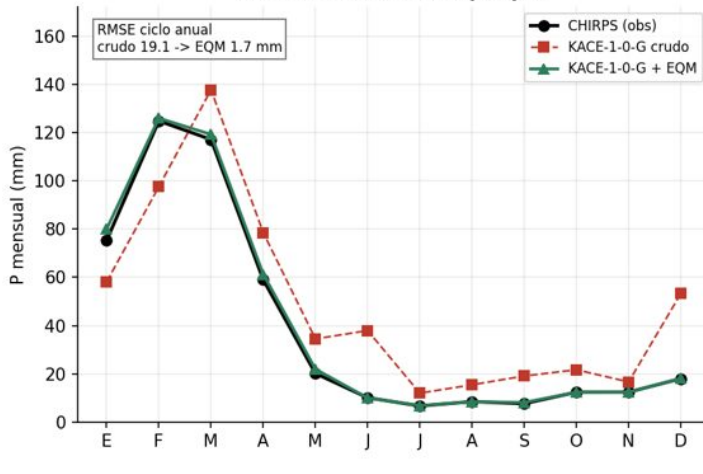
4. 34 modelos NASA NEX-GDDP-CMIP6: selección y corrección de sesgo

Se evaluaron **34 modelos** contra CHIRPS (1981-2014) por RMSE de la climatología mensual; se corrigió el sesgo por **EQM mensual** y se ponderó el ensamble por desempeño e independencia (**ClimWIP**). El mejor modelo es **KACE-1-0-G** (RMSE 17,8 mm/mes).

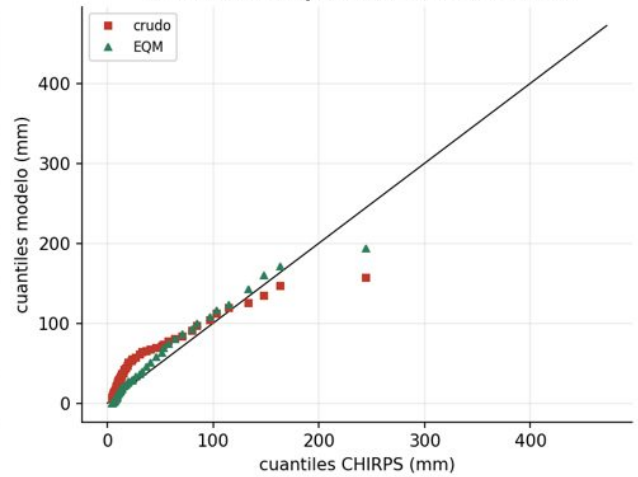
Modelo	RMSE (mm/mes)	P anual (mm)	Sesgo (mm)	r ciclo
KACE-1-0-G	17,8	542	70	0,918
MIROC-ES2L	27,5	693	221	0,951
CMCC-ESM2	28,0	718	246	0,950
TaiESM1	28,4	718	246	0,941
IPSL-CM6A-LR	29,1	739	267	0,948

Se muestran los 5 mejores; los 34 están en [data/cmip6_ranking_rmse.csv](#).

Ciclo anual: corrección de sesgo EQM validación cruzada impar/par



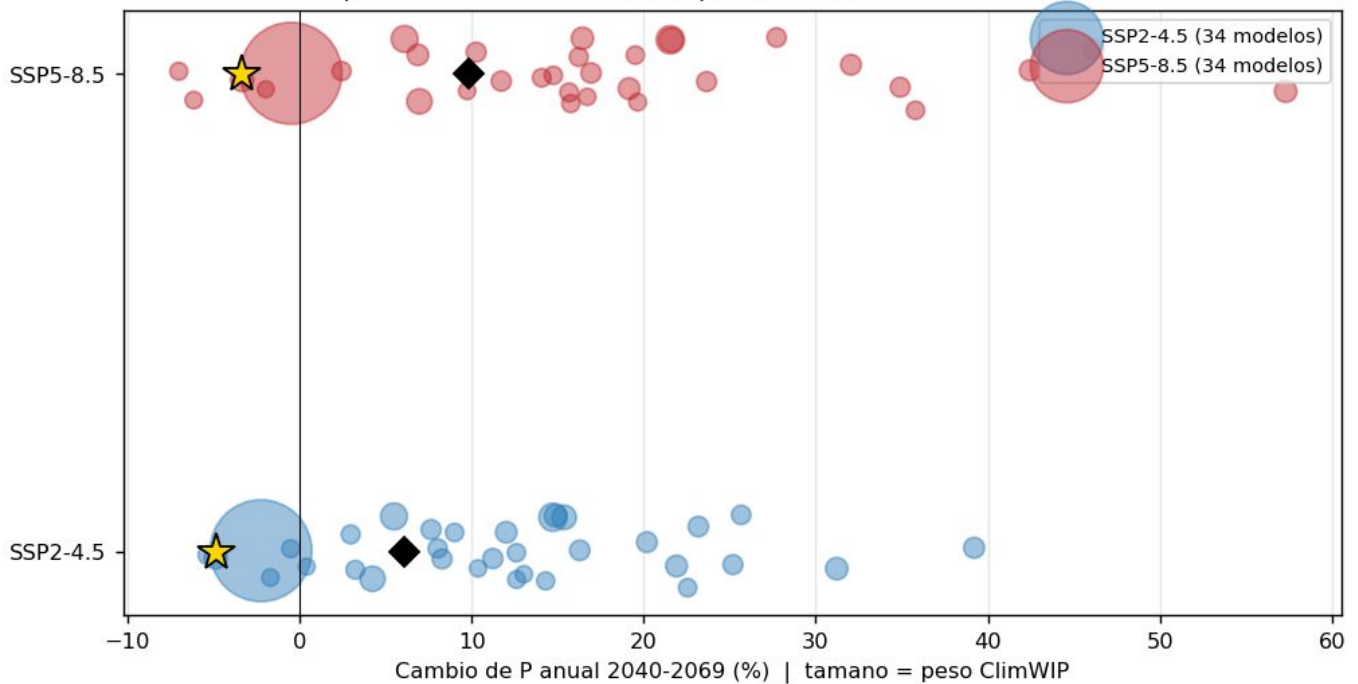
Q-Q antes / después (totales mensuales)



Machala: 1981-2014, media areal de la cuenca. Modelo con menor RMSE del ranking (34 NEX-GDDP-CMIP6). Validación cruzada: calibra con años impares y evalúa en pares (y al revés).

Corrección de sesgo EQM del mejor modelo, con validación cruzada impar/par: ciclo anual (izq.) y Q-Q de totales mensuales (der.). La corrección ajusta la distribución histórica; no crea procesos que el modelo no simula (Maraun 2013).

Ensamble ponderado: rombo=media ponderada, estrella=modelo unico (CMCC)



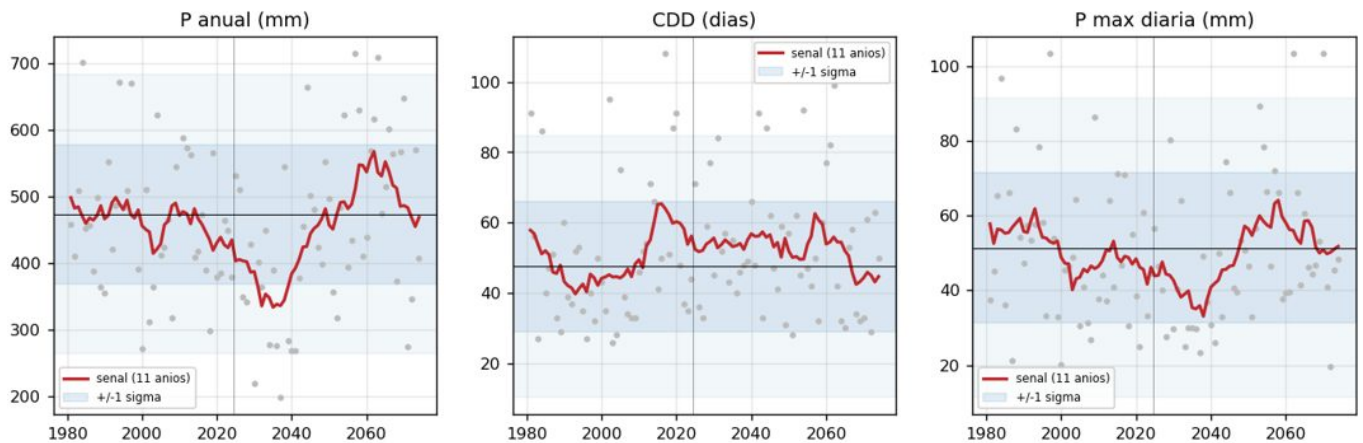
Ensamble ponderado ClimWIP: cambio de precipitación con incertidumbre P10–P90.

5. Time of Emergence (cuándo emerge la señal)

Señal/ruido (Hawkins & Sutton 2012; ensamble: Lickley 2024). Al incluir la **dispersión entre modelos**, el ToE honesto se retrasa: “>2074” significa que la señal no emerge con confianza dentro del siglo.

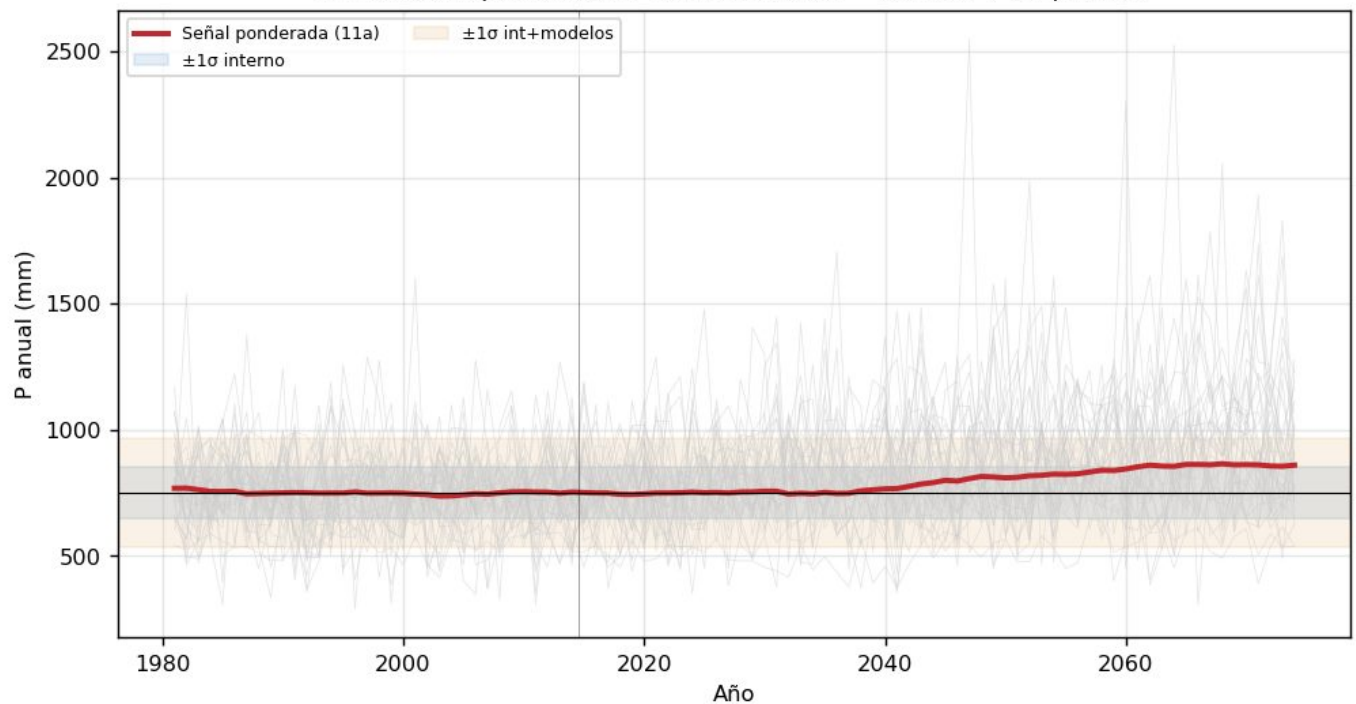
Umbral	Ruido	N (mm)	ToE
1sigma	solo interno	104,0	2062
1sigma	int+modelos	216,0	>2074
2sigma	solo interno	104,0	>2074
2sigma	int+modelos	216,0	>2074

Time of Emergence — cuando el cambio supera la variabilidad natural (SSP5-8.5)



Time of Emergence por indicador (serie solo-modelo).

ToE con ensamble multi-modelo — Machala (P anual, SSP5-8.5)
34 modelos ponderados ClimWIP; ruido = interno + dispersión

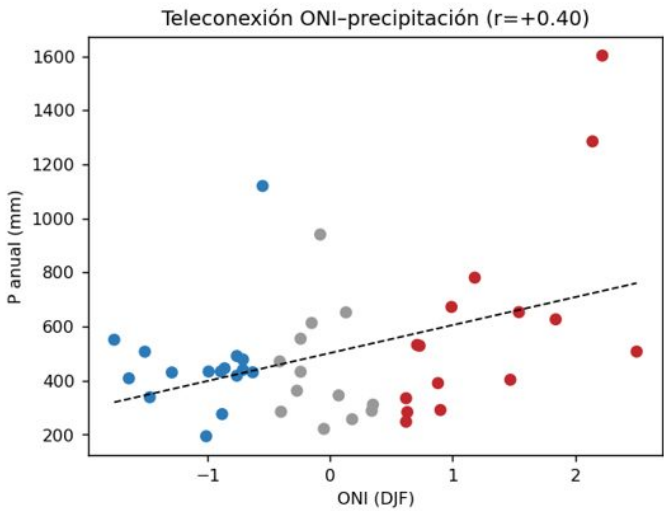
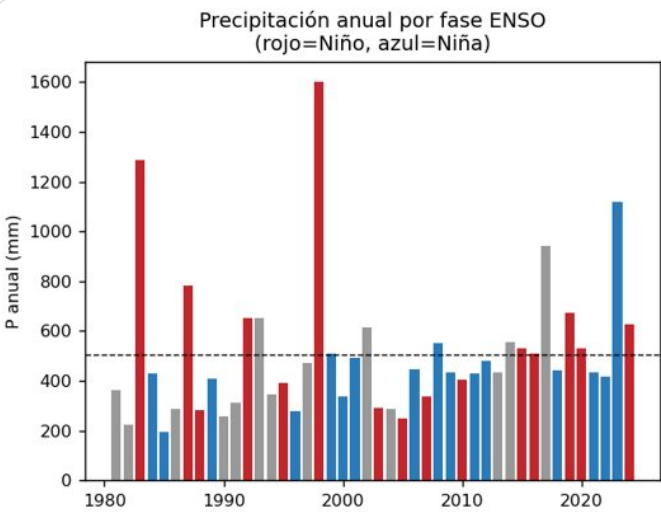


ToE con ensamble (ruido interno + dispersión entre modelos).

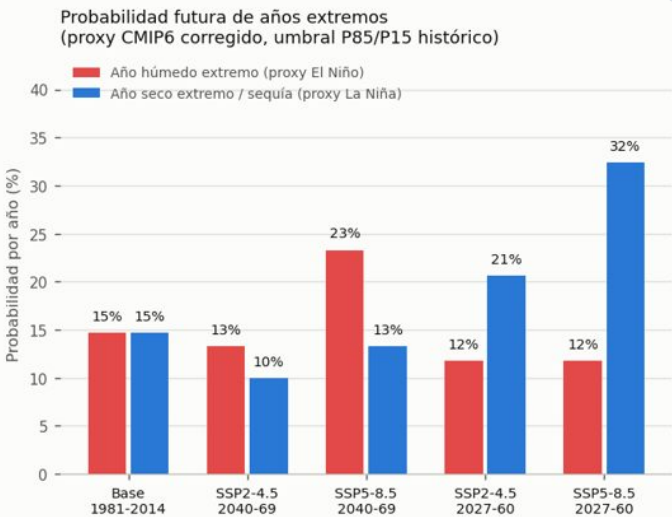
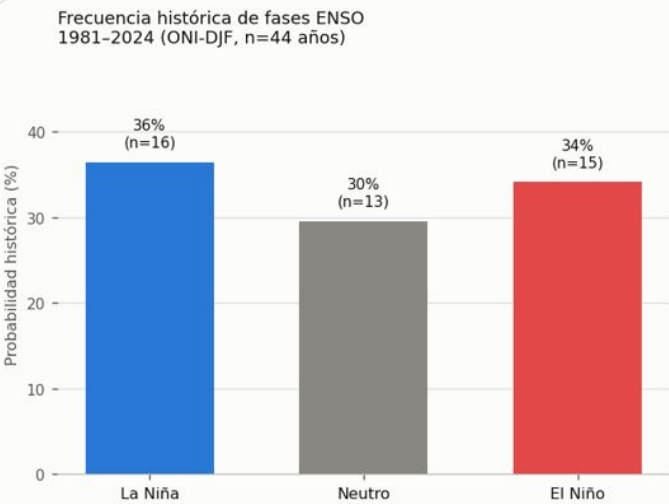
6. ENSO (El Niño / La Niña) y precipitación

Composición de la precipitación por fase del ONI (NOAA) sobre CHIRPS 1981-2025. Anomalía respecto a la media 1981-2025: **El Niño +20,4%, La Niña -8,7%**. La señal ENSO es apreciable en esta cuenca.

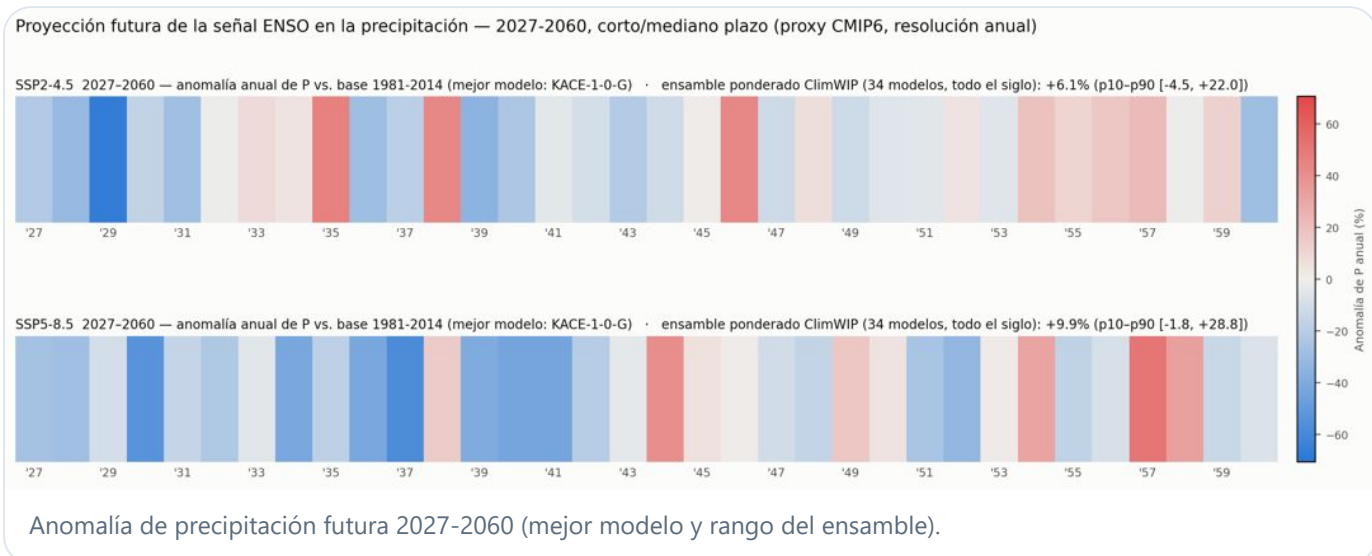
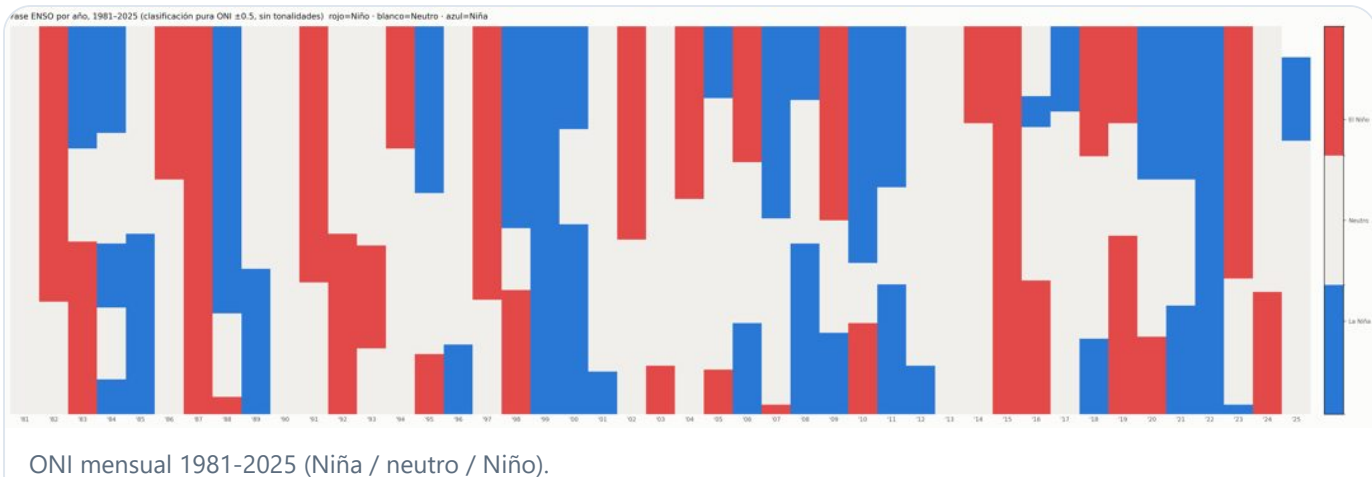
Fase	P media anual (mm)	Años	Anomalía (%)	Prob. (%)
Neutro	441	13	-12,8	29,5
Nina	462	16	-8,7	36,4
Nino	609	15	+20,4	34,1



Precipitación por fase ENSO (pasado) y dispersión.

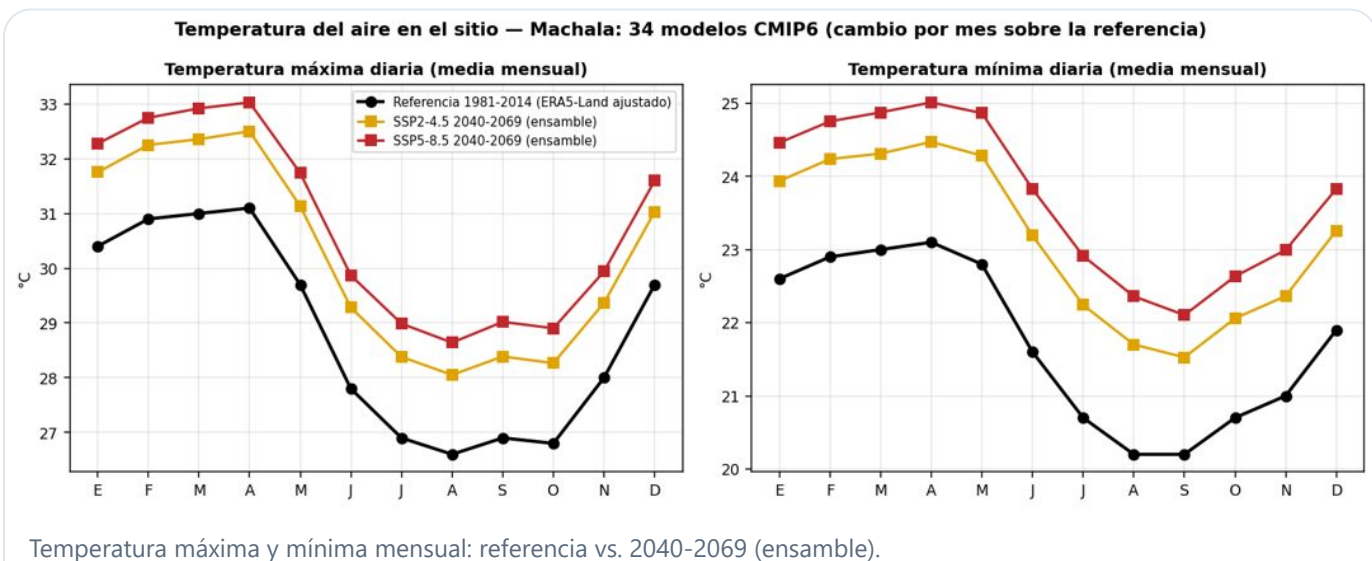


Probabilidad histórica por fase vs probabilidad futura de año extremo.

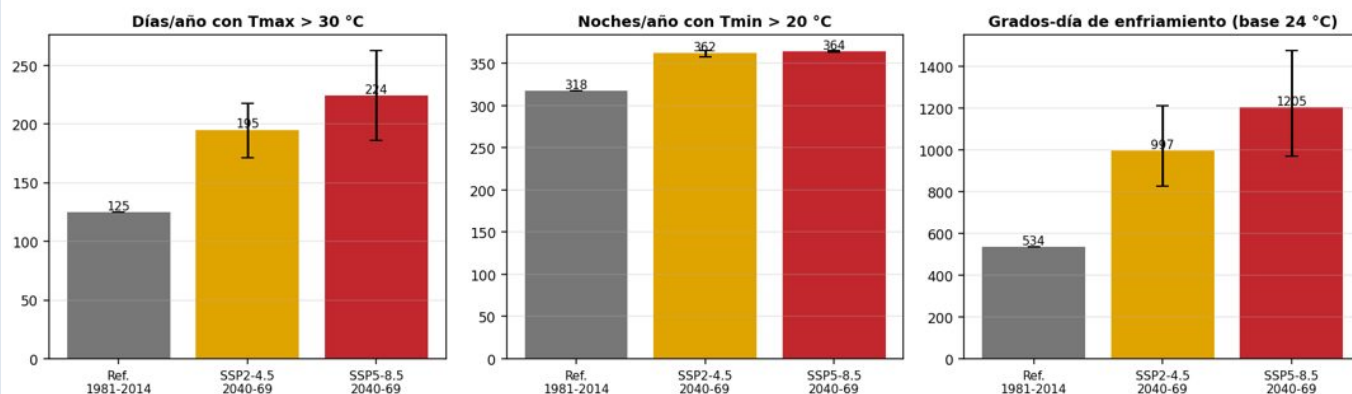


7. Temperatura y confort térmico (34 modelos CMIP6)

Referencia del sitio: T media **25,2 °C**, Tmax media **28,8 °C**, **125** días/año con Tmax > 30 °C. Con 34 modelos CMIP6, hacia 2040-2069 el calentamiento medio es **+1,5 °C** (SSP2-4.5) y **+2,0 °C** (SSP5-8.5; P10–P90 1,4–2,8 °C): los días con Tmax > 30 °C pasan de 125 a **224** y las noches con Tmin > 20 °C de 318 a **364**.



Indicadores de calor en el sitio (media del ensamble y rango P10-P90 entre modelos)

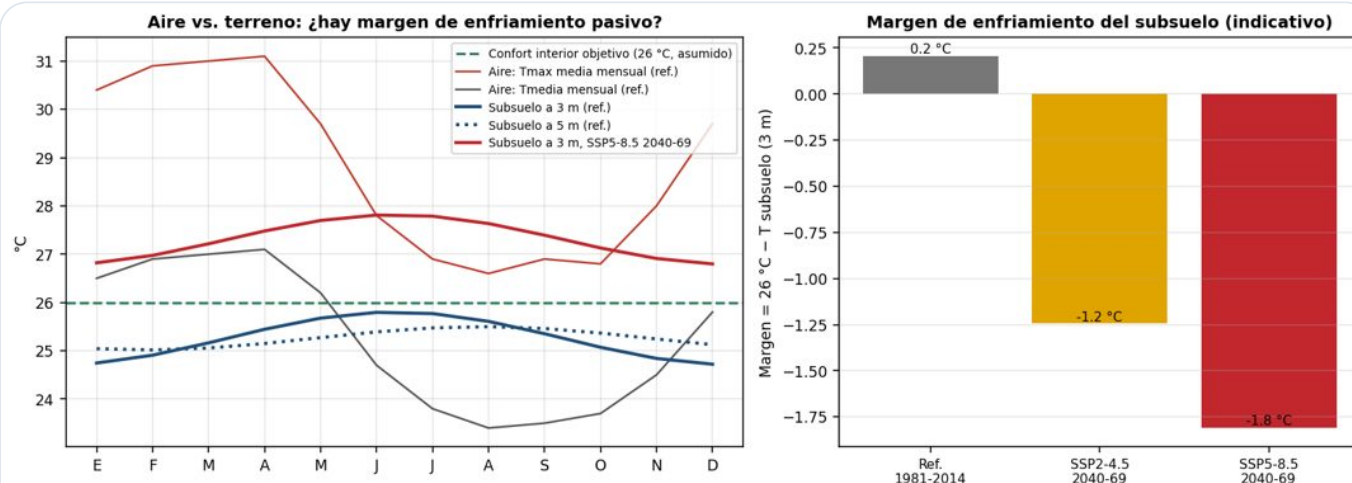


Indicadores de calor: días cálidos, noches cálidas y grados-día de enfriamiento.

Potencial de enfriamiento pasivo por el terreno (indicativo)

Temperatura del subsuelo por onda armónica amortiguada ($\approx T$ media anual del aire a esa profundidad) frente a una T interior objetivo de 26 °C (asumida). Requiere medir T del suelo y propiedades térmicas en el sitio.

Escenario	T subsuelo (media)	T subsuelo (máx.)	Margen de enfriamiento
Referencia 1981-2014	25,3 °C	25,8 °C	0,2 °C
SSP2-4.5 2040-2069	26,7 °C	27,2 °C	-1,2 °C
SSP5-8.5 2040-2069	27,3 °C	27,8 °C	-1,8 °C



Aire vs. subsuelo y margen de enfriamiento pasivo.

Método: referencia diaria ERA5-Land con la media mensual anclada a WorldClim v1 (1 km) + cambio mensual de cada modelo (delta-change). Sin estación in situ el sesgo residual puede ser de $\pm 1\text{--}2\text{ °C}$: contrastar con la estación INAMHI más cercana.

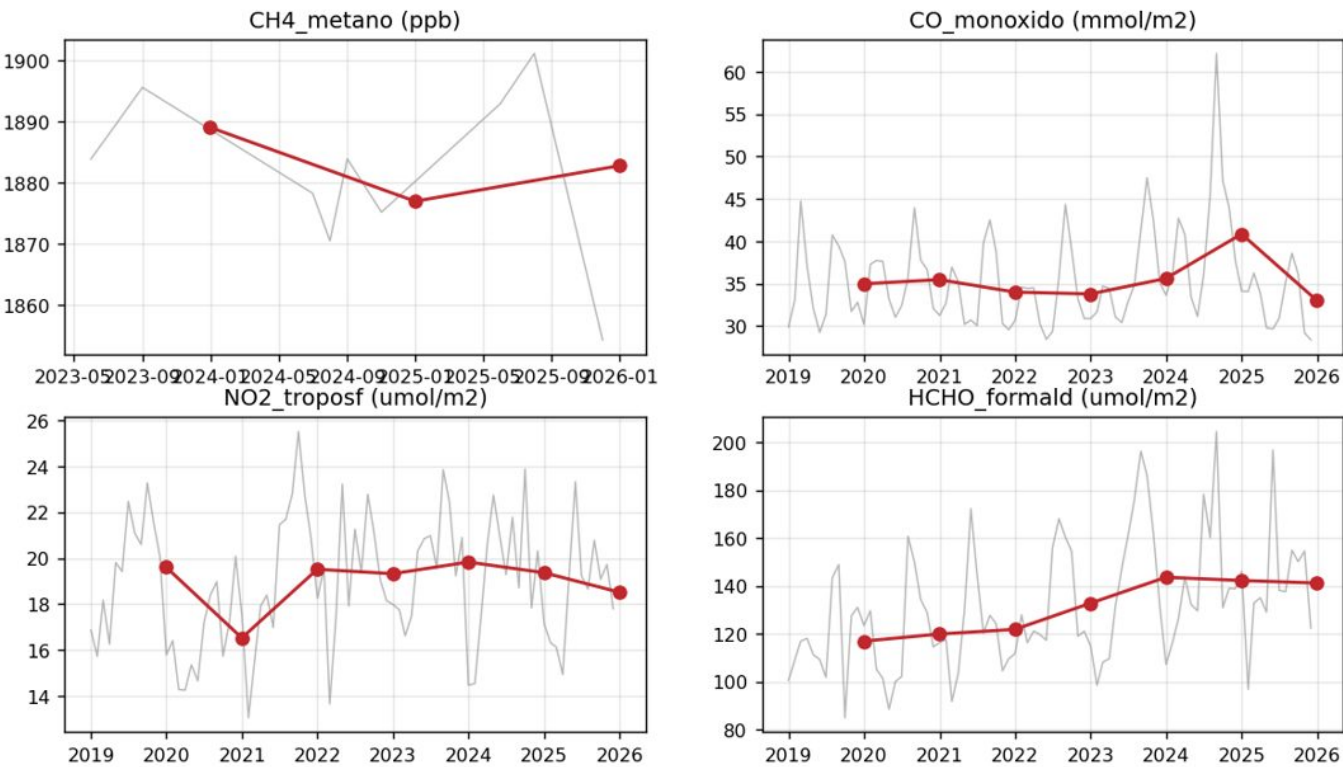
8. Gases de efecto invernadero (TROPOMI) y fuego

Columnas de CH₄, CO, NO₂ y HCHO sobre la cuenca (Sentinel-5P) con tendencia anual (Spearman). CO₂ no está en GEE: requiere EDGAR/ODIAC.

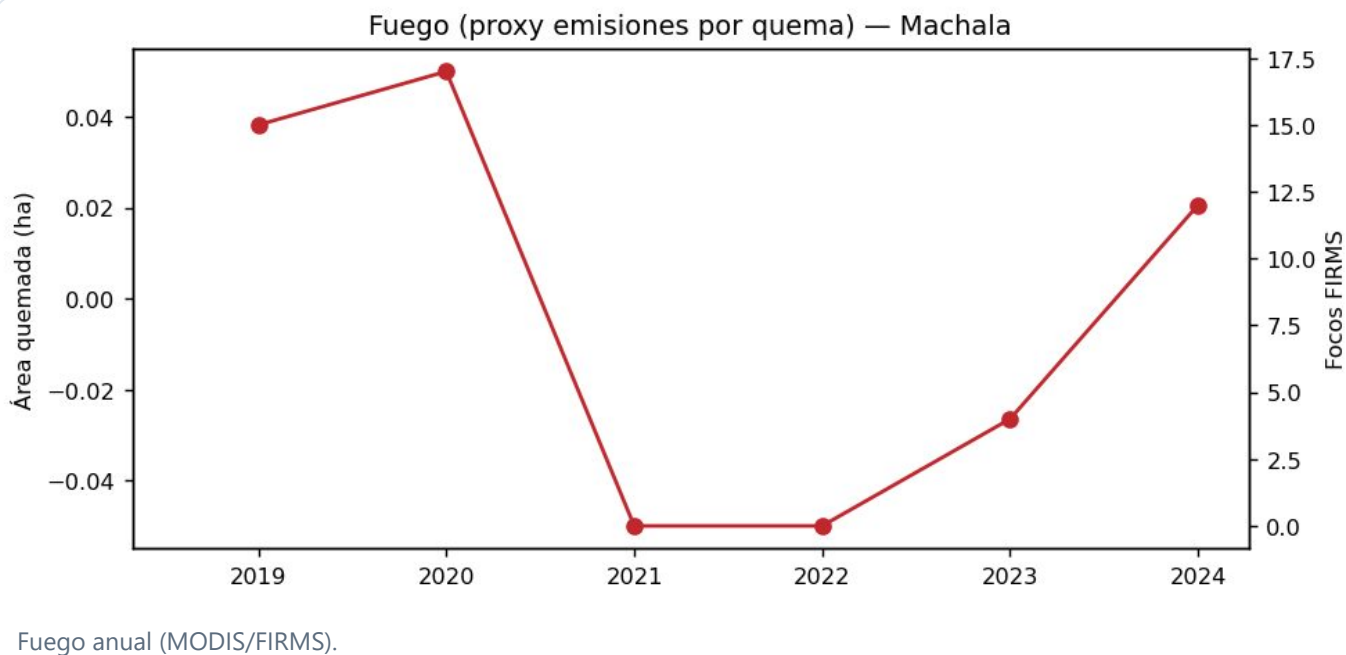
Gas	Media	Unidad	Tendencia/año	p	Signif. 5%
CO_monoxido	35,4	mmol/m2	-0,217	0,879	no
NO2_troposf	19,0	umol/m2	-0,048	0,760	no
HCHO_formald	131,2	umol/m2	4,838	0,014	si

Sin tendencia para: CH₄_metano (cobertura de datos insuficiente por nubosidad persistente; TROPOMI requiere suficientes meses válidos).

GEI/contaminantes TROPOMI — Machala (2019-2025)

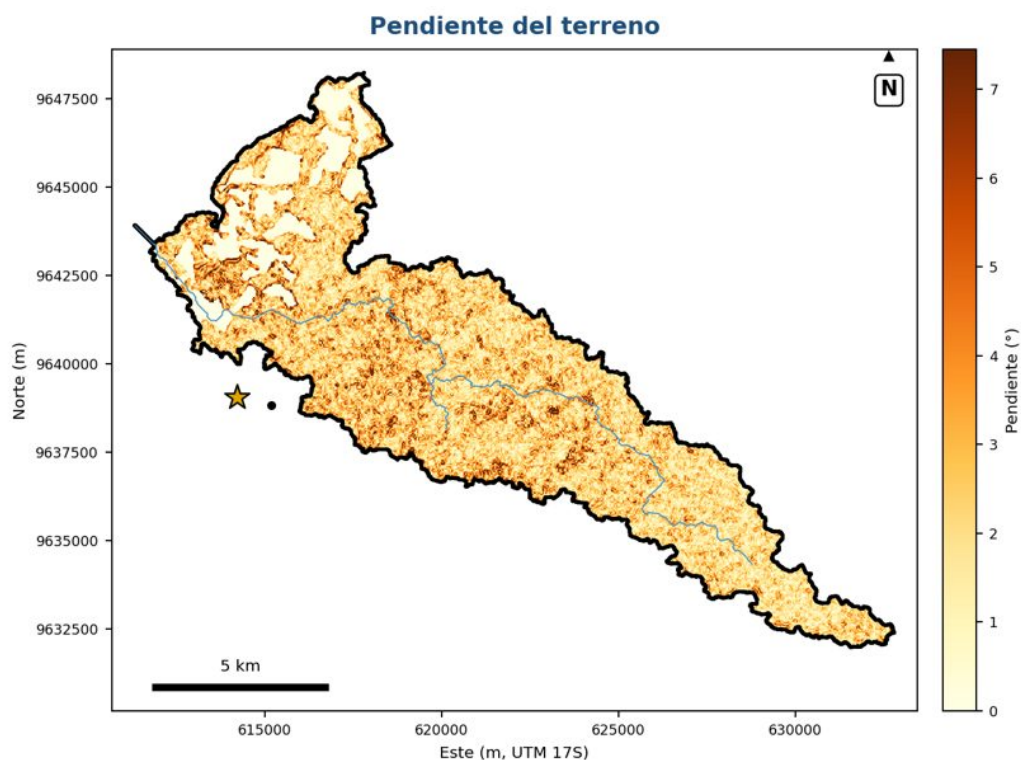


Series mensuales de GEI con tendencia.

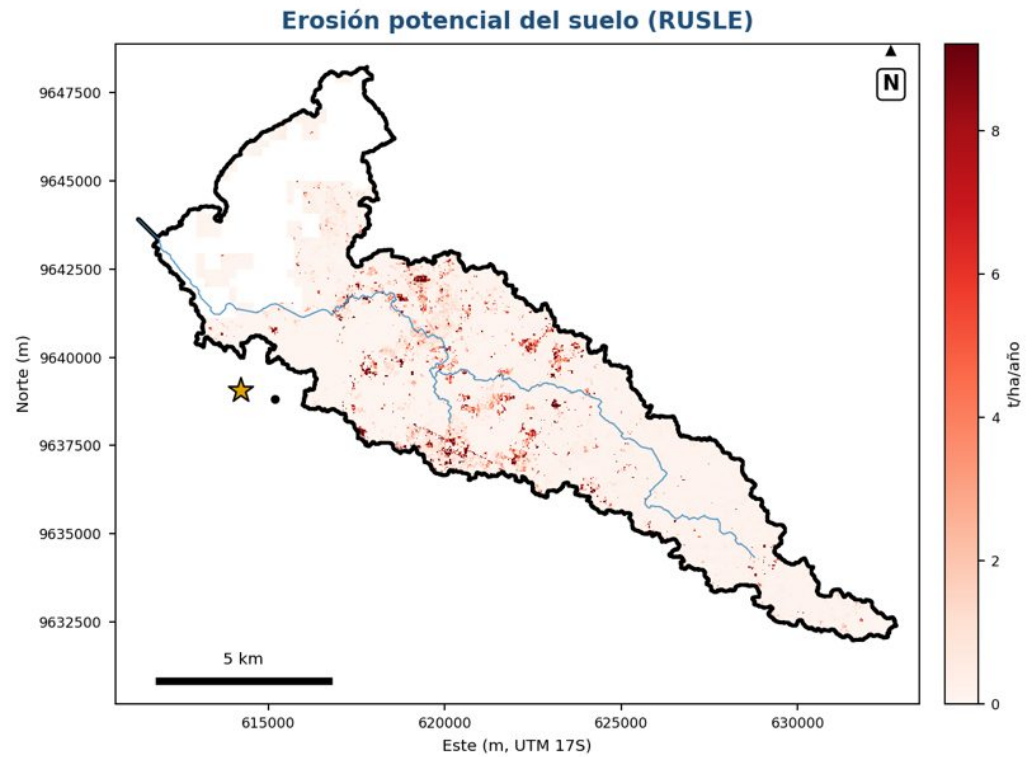


9. Pendiente y erosión potencial del suelo (RUSLE)

La pendiente controla la velocidad de escorrentía y la susceptibilidad a movimientos en masa; la erosión potencial (RUSLE) prioriza dónde intervenir la cobertura. Pendiente media de la cuenca **2,2°** (0% del área > 15°); en el sitio, **-inf°**. Erosión potencial: mediana **0,1 t/ha/año**; 1% del área supera 10 t/ha/año.



Pendiente del terreno (°), cuenca de análisis: contorno negro, red hídrica en azul, estrella = sitio del proyecto.



Erosión potencial del suelo (RUSLE, t/ha/año), misma cuenca.

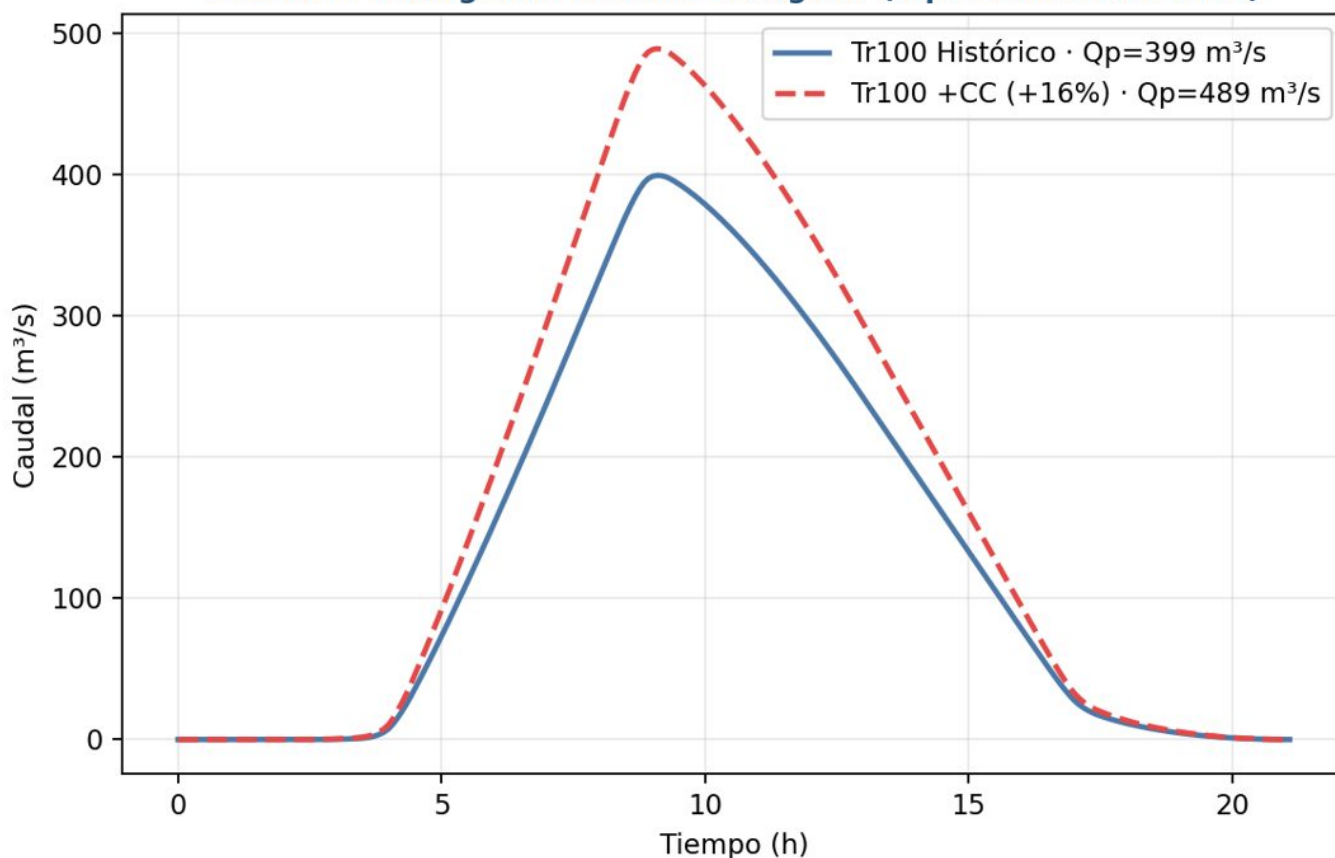
RUSLE a 30 m con factor LS simplificado: sirve para **comparar zonas y priorizar**, no para cuantificar la pérdida absoluta de suelo (se debe calibrar con parcelas o sedimentos medidos).

10. Hidrología — HEC-HMS (equivalente analítico)

Tormenta de diseño (bloque alterno) + SCS-CN (CN=80,6) + hidrograma unitario triangular, $T_c=8,07$ h, área aportante al sitio (microcuenca) $93,8 \text{ km}^2$, cauce principal 32,3 km, pendiente 0,4 %.

Tr	Q pico histórico	Q pico +CC	Δ
25	309 m ³ /s	382 m ³ /s	+24%
50	355 m ³ /s	437 m ³ /s	+23%
100	399 m ³ /s	489 m ³ /s	+22%

Hidrograma de crecida — zona Machala (Tr 100) SCS-CN + hidrograma unitario triangular (equivalente HEC-HMS)



Hidrograma de crecida Tr 100 — histórico vs cambio climático.

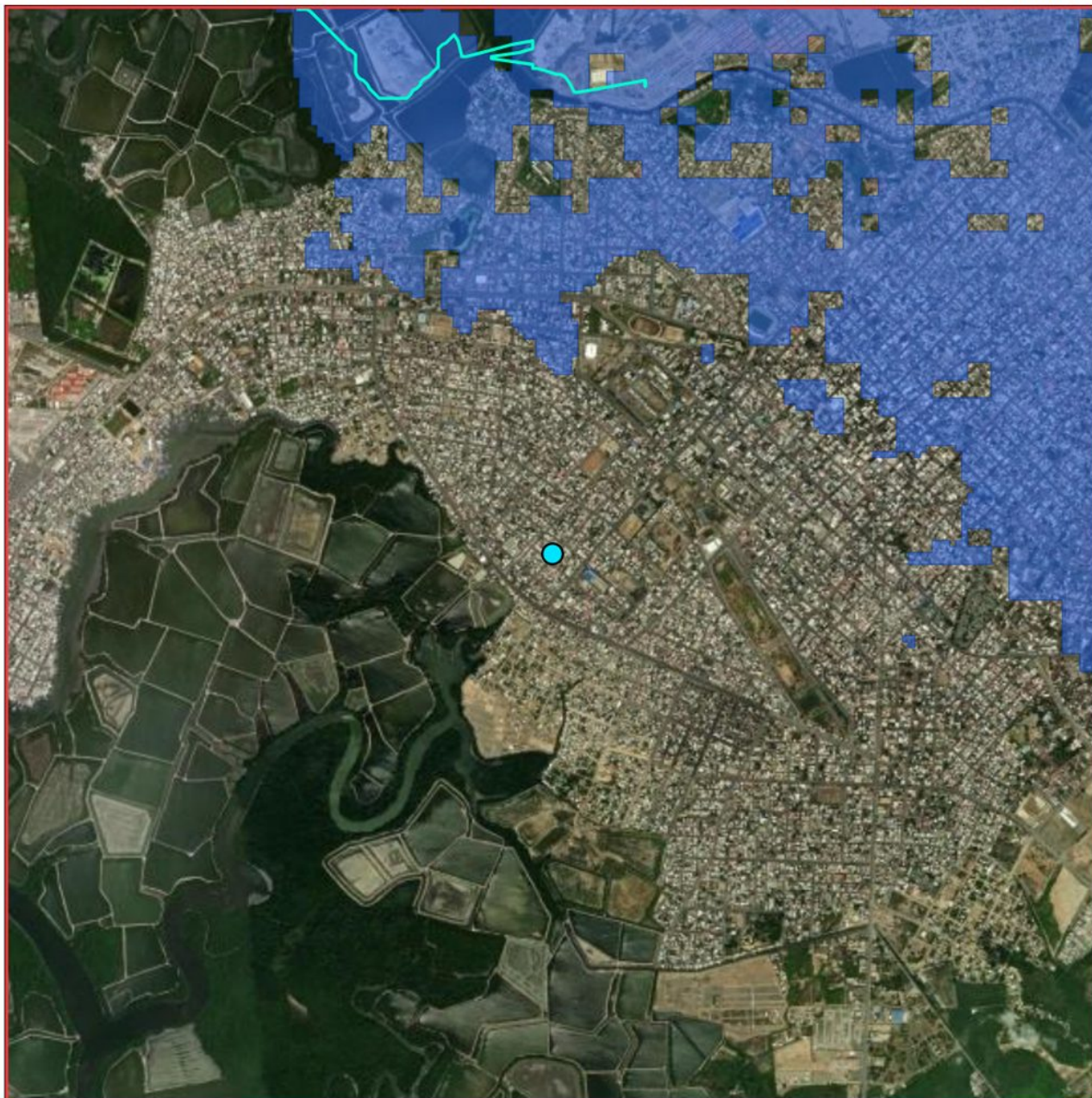
11. Inundación por HAND (normal-depth sobre el río mejorado)

Calado por HAND + normal-depth sobre el río GEOGLOWS ajustado al thalweg del MDT.

El raster HAND solo cubre **26 %** de la carta (queda limitado a la cuenca delineada): esta mancha es válida únicamente en ese sector. Para el entorno completo del sitio use el **modelo 2D** (sección siguiente).

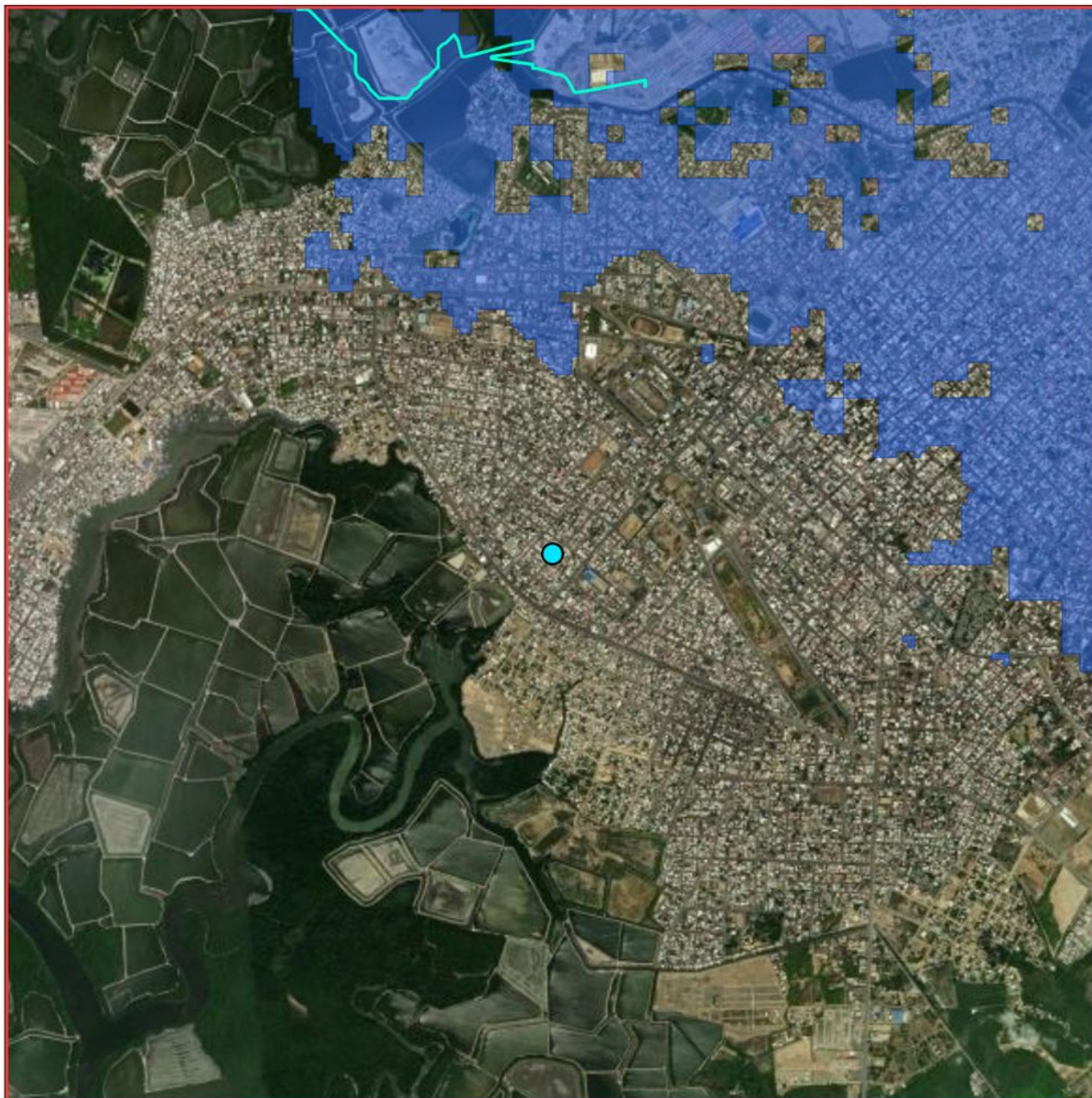
Tr	Área inundada	Calado máx
25	6,3 km ² (21%)	2,17 m
50	6,6 km ² (21%)	2,35 m
100	6,8 km ² (22%)	2,52 m

Inundación Tr 25 · +CC ($Q=382 \text{ m}^3/\text{s}$ · área 6.31 km^2 · calado máx 2.17 m)
Río GEOGLOWS mejorado (MDT) · contiene 94% del agua JRC · equivalente HEC-RAS (simplif.)



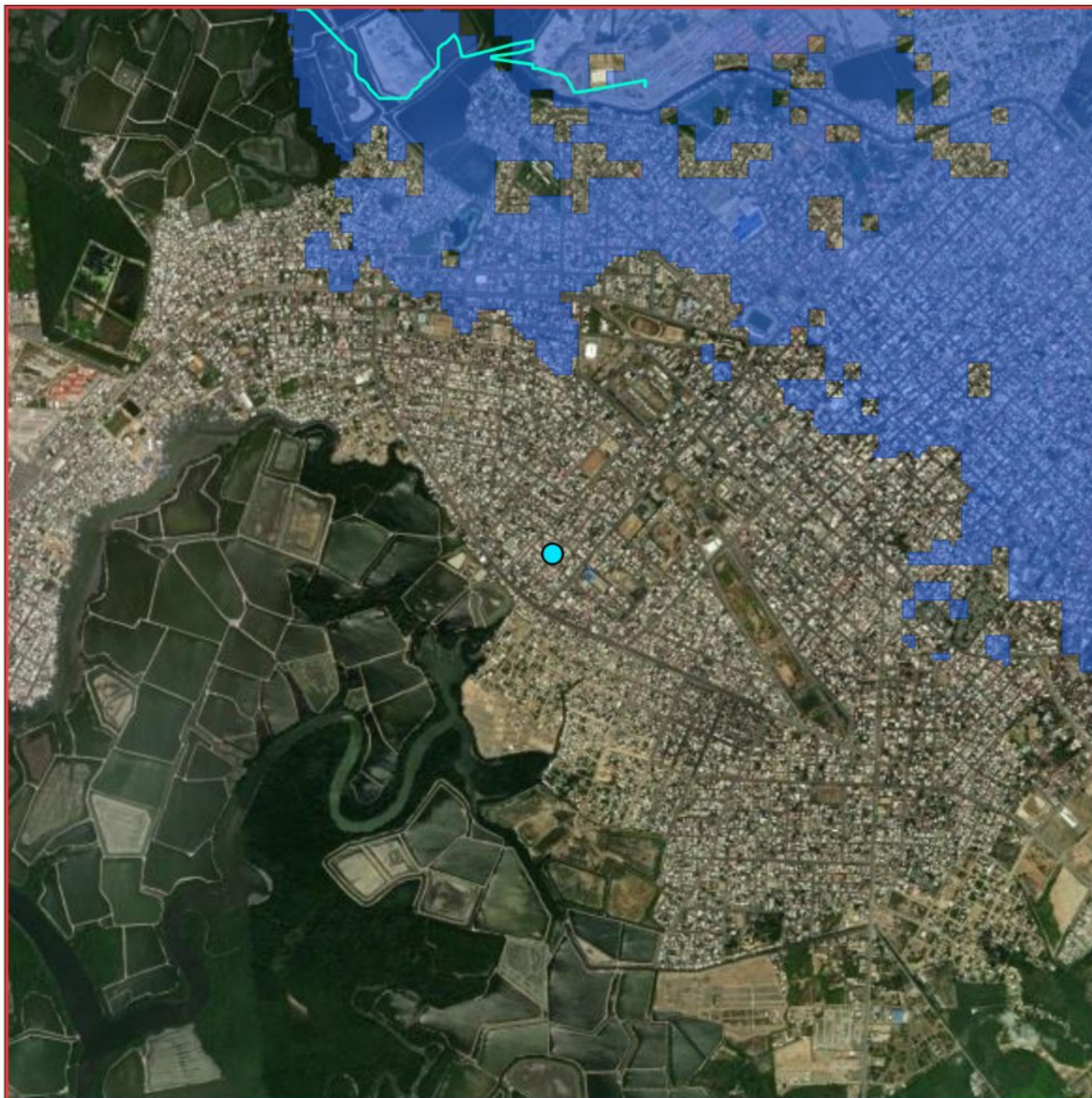
Mancha Tr 25 (+CC).

Inundación Tr 50 · +CC ($Q=437 \text{ m}^3/\text{s}$ · área 6.57 km^2 · calado máx 2.35 m)
Río GEOGLOWS mejorado (MDT) · contiene 94% del agua JRC · equivalente HEC-RAS (simplif.)



Mancha Tr 50 (+CC).

Inundación Tr 100 · +CC ($Q=489 \text{ m}^3/\text{s}$ · área 6.8 km^2 · calado máx 2.52 m)
Río GEOGLOWS mejorado (MDT) · contiene 94% del agua JRC · equivalente HEC-RAS (simplif.)



Mancha Tr 100 (+CC) — río mejorado.

12. Validación con datos observados

JRC Global Surface Water calibra el cauce (no la crecida); No se dispone de una huella observada de un evento para este cantón (Sentinel-1 no se ha procesado); el modelo se contrasta con el agua permanente JRC.



Modelo Tr100+CC vs agua observada JRC.

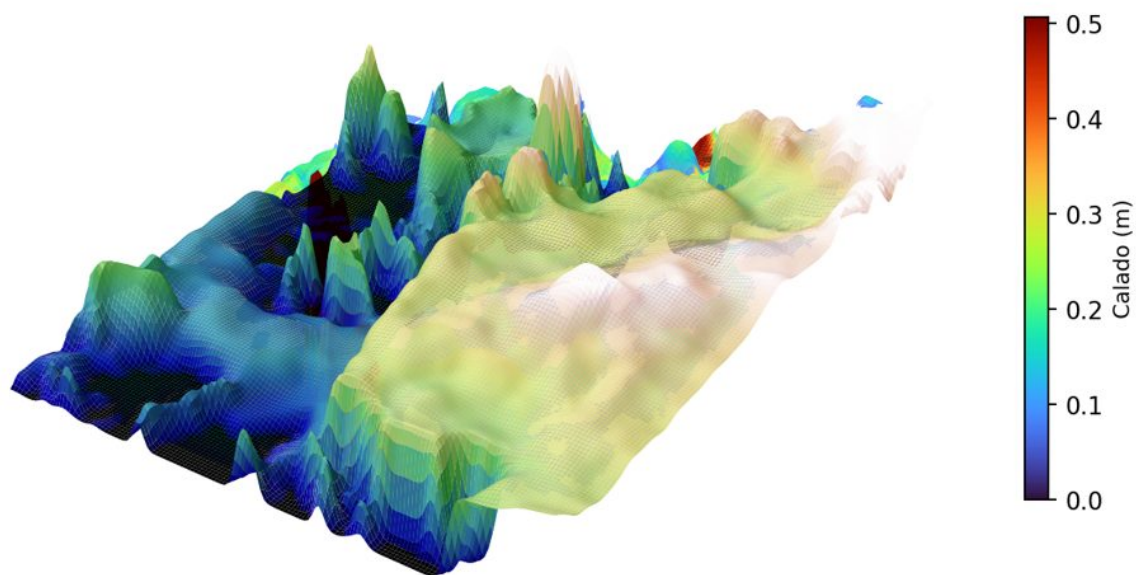
13. Modelo 2D y gemelo digital 3D

Esquema de inercia local (tipo LISFLOOD-FP) con lluvia sobre malla + caudal del río, sobre **FABDEM (suelo desnudo)** con el cauce quemado. Preliminar: el calado definitivo lo da HEC-RAS.

Tr	Calado p99	Área inundada (>6 cm)	Área $\geq 0,5$ m	Área ≥ 1 m	Vel. máx*
25	0,49 m	18,9 km ² (62%)	0,2 km ²	0,1 km ²	5,0 m/s
50	0,54 m	19,9 km ² (65%)	0,2 km ²	0,1 km ²	5,0 m/s
100	0,58 m	20,7 km ² (68%)	0,4 km ²	0,2 km ²	5,0 m/s

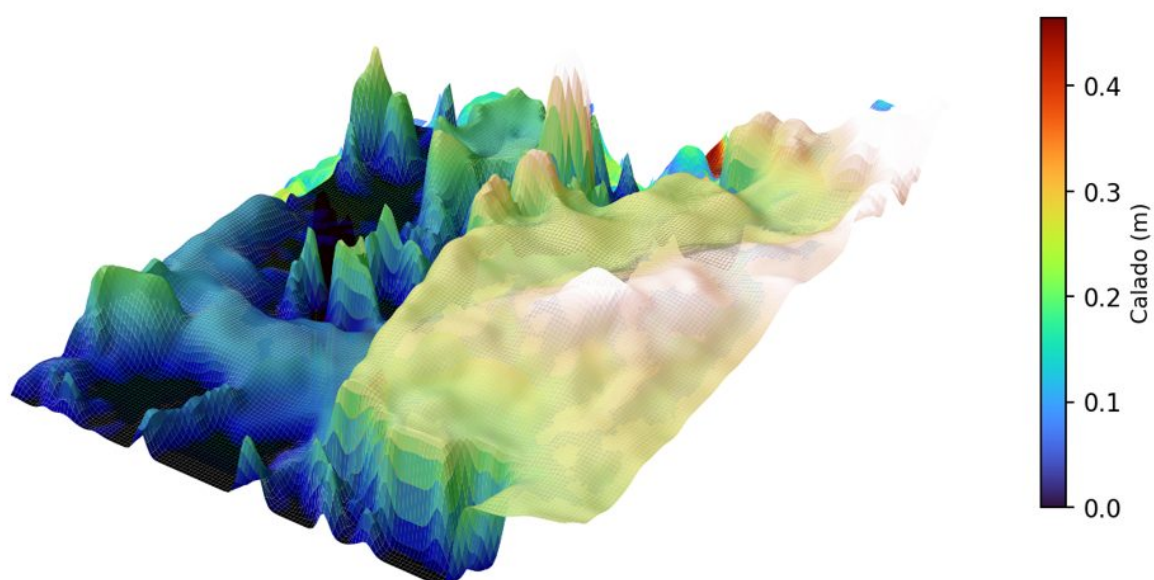
* La velocidad máxima está limitada por el solver (tope 5 m/s). El área >6 cm incluye escorrentía laminar de la lluvia sobre la malla; para el peligro real usar las áreas con calado $\geq 0,5$ m y ≥ 1 m.

Gemelo 3D de inundación — Machala · Tr 100 +CC (FABDEM suelo desnudo)



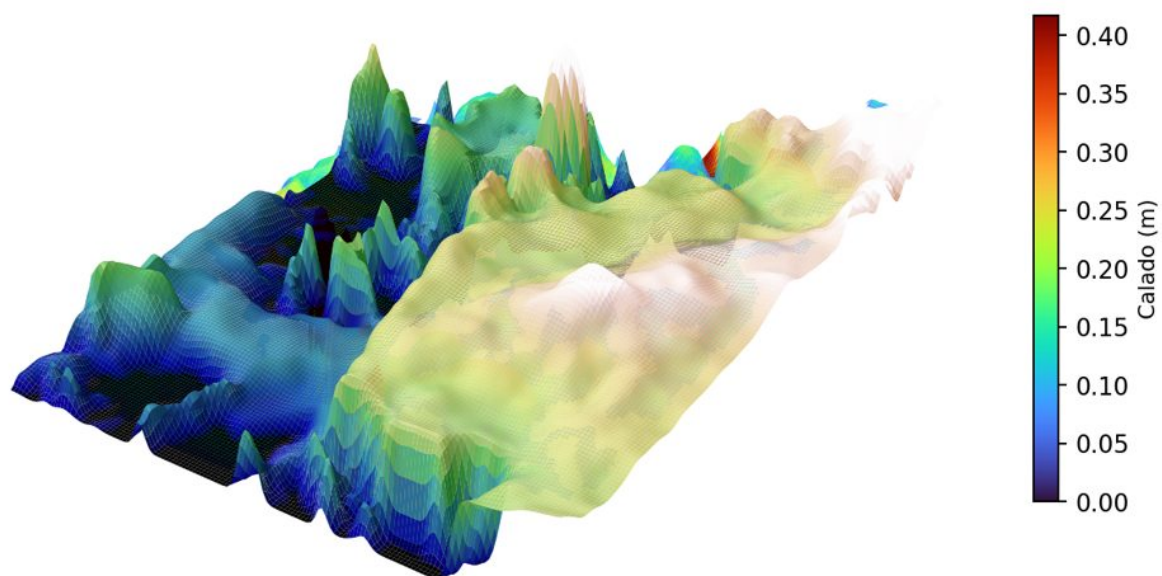
Gemelo 3D Tr 100 +CC.

Gemelo 3D de inundación — Machala · Tr 50 +CC (FABDEM suelo desnudo)



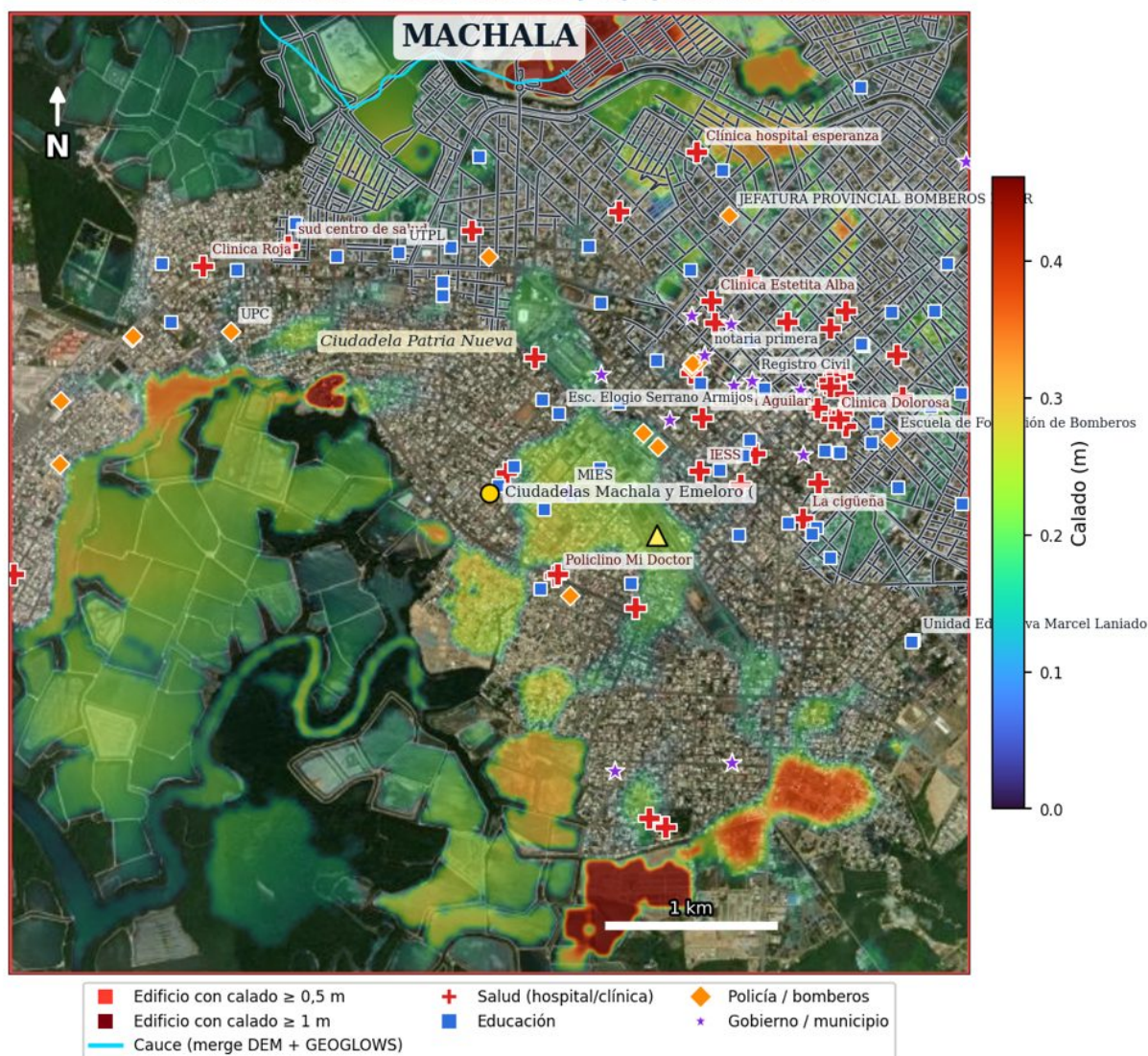
Gemelo 3D Tr 50 +CC.

Gemelo 3D de inundación — Machala · Tr 25 +CC (FABDEM suelo desnudo)



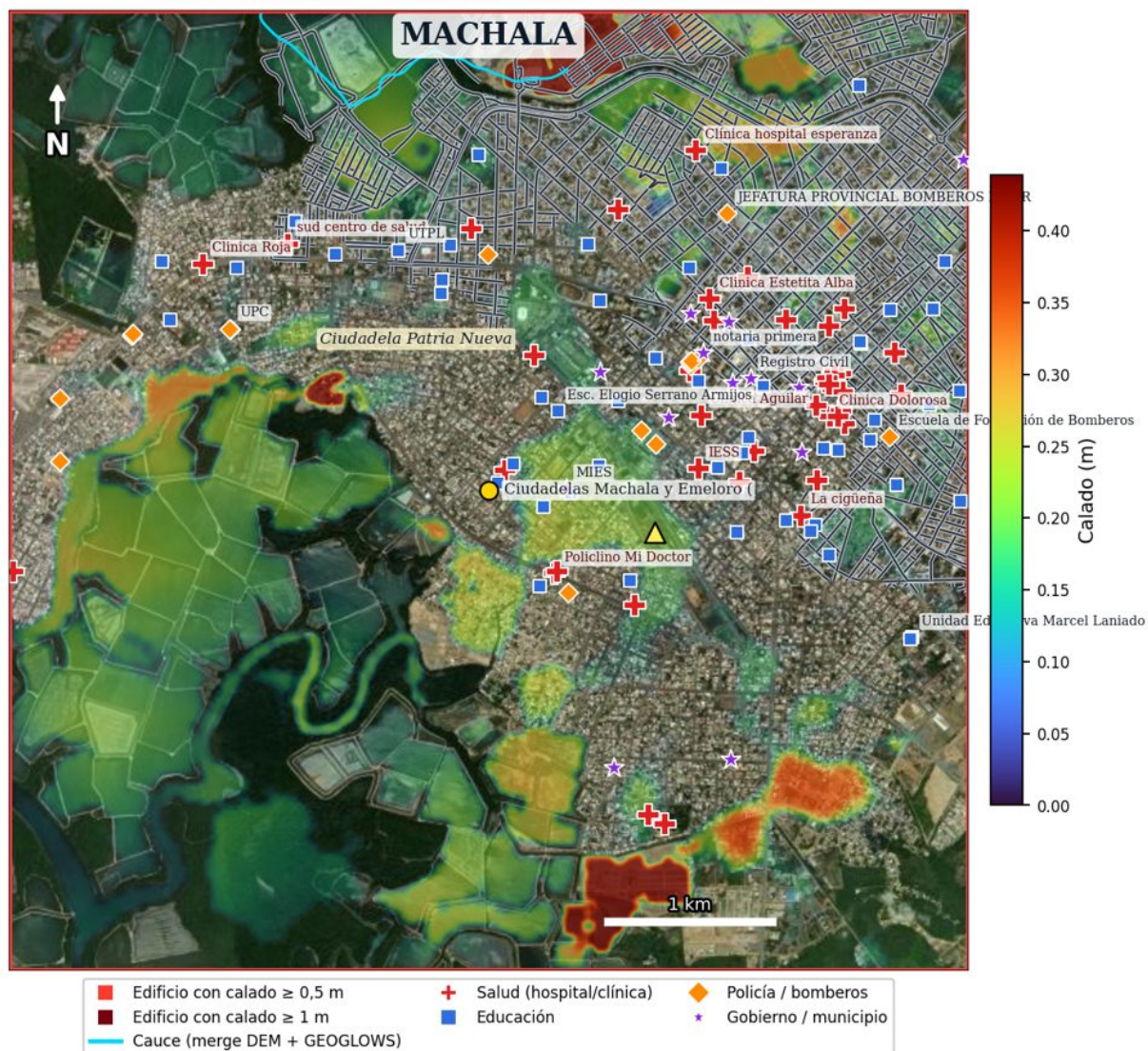
Gemelo 3D Tr 25 +CC.

Inundación 2D (FABDEM) — Tr 100 +CC · calado p99 0,58 m · 20,7 km² (>6 cm) · 8 edificios con $\geq 0,5$ m calado suavizado · calles, edificios y equipamiento OSM



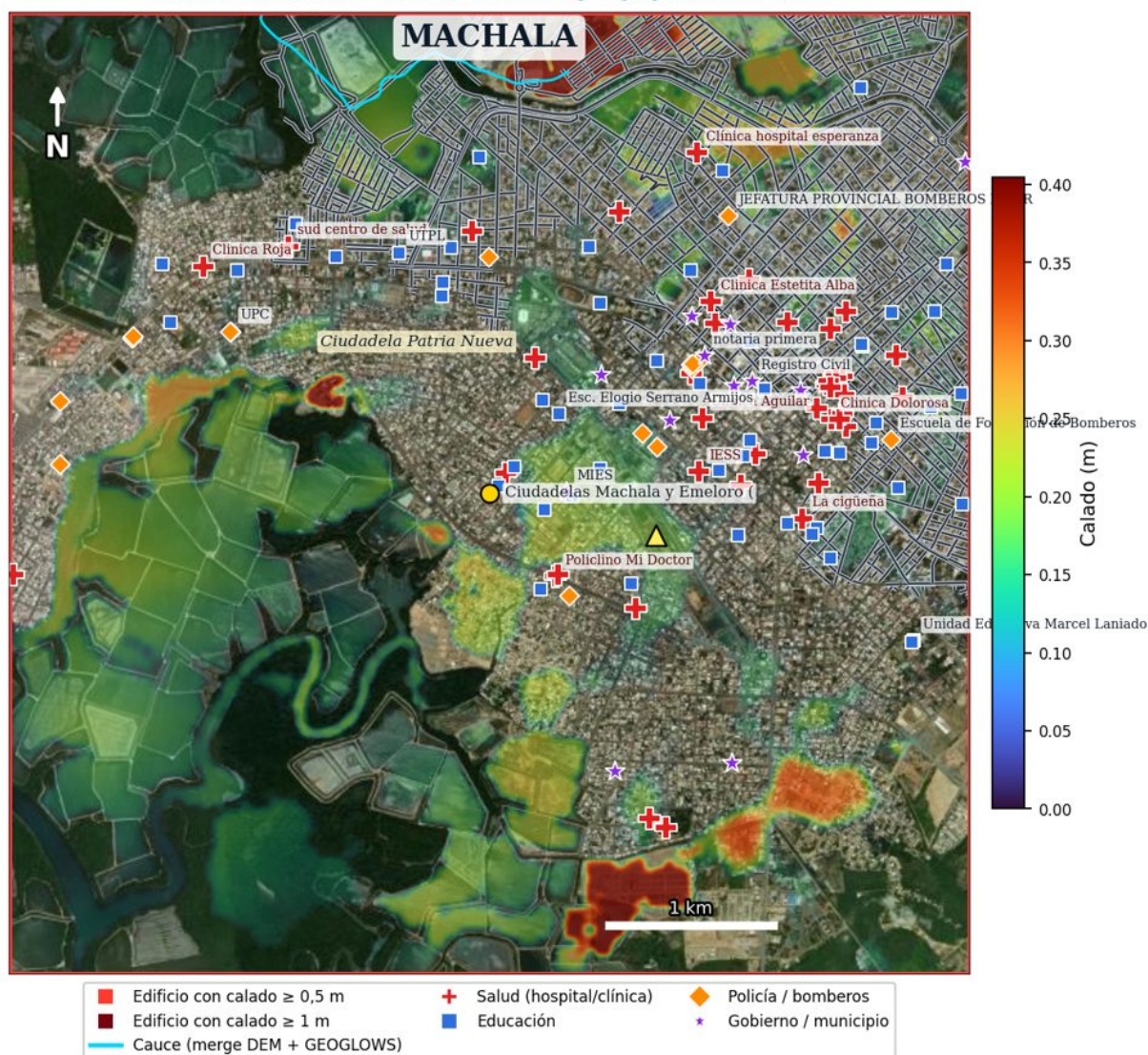
Calado 2D (FABDEM) Tr 100 +CC — flujo suavizado, con calles, edificios (rojo = expuestos) y equipamiento.

Inundación 2D (FABDEM) — Tr 50 +CC · calado p99 0,54 m · 19,9 km² (>6 cm) · 7 edificios con ≥ 0,5 m calado suavizado · calles, edificios y equipamiento OSM



Calado 2D Tr 50 +CC.

Inundación 2D (FABDEM) — Tr 25 +CC · calado p99 0,49 m · 18,9 km² (>6 cm) · 0 edificios con ≥ 0,5 m calado suavizado · calles, edificios y equipamiento OSM



Calado 2D Tr 25 +CC.

14. Exposición: edificaciones e instalaciones críticas

Edificaciones (huellas: OSM) e instalaciones críticas (hospitales, clínicas, escuelas, policía, bomberos, gobierno) según el calado del 2D en su ubicación. Preliminar: sujeto a la calidad del 2D y a la cobertura de OSM.

Tr	Edificios en la zona	Con calado ≥ 0,5 m	%	Con calado ≥ 1 m	%
25	2.448	0	0,0%	0	0,0%
50	2.448	7	0,3%	0	0,0%
100	2.448	8	0,3%	0	0,0%

Instalaciones críticas (OSM) analizadas: 120. **Ninguna** con calado ≥ 0,3 m en Tr 25-100.

Queda listo el **paquete HEC-RAS 2D** (terreno, Manning, dominio 2D, condiciones de borde e hidrogramas) para RAS Mapper.

Montaje HEC-RAS 2D — zona Machala
Terreno + dominio 2D + condiciones de borde (inflow/outflow) + río mejorado



Montaje HEC-RAS 2D — dominio, río y condiciones de borde.

15. Conclusiones

- El cambio climático eleva el caudal de diseño Tr100 de **399 a 489 m³/s (+22%)** y las intensidades IDF **+16%**.
- Ensemble ClimWIP SSP5-8.5: precipitación anual **+9,9%** (P10–P90 [-1.8, +28.8]).
- Time of Emergence con dispersión entre modelos: 1sigma → >2074, 2sigma → >2074.
- Inundación por HAND Tr100+CC: **6,8 km²**, calado máx **2,52 m**.
- 2D sobre FABDEM Tr100+CC: **20,7 km² (68%)**, calado p99 **0,58 m**, velocidad máx 5,0 m/s.
- Vías comprometidas (Tr100+CC): **97,1 km**.
- Entregables en **shapes (WGS84 + UTM)**, **Excel y mapas**; el 2D propio es preliminar y se afina con HEC-RAS.

16. Limitaciones

- GEOGLOWS sobreestima el caudal (~4×): se usa su estructura, no su magnitud.
- La corrección EQM amplifica extremos: por eso el factor de diseño sale del ensamble.
- NDVI-RF es indicativo (R^2 bajo).
- La HMS es un equivalente analítico, no un modelo calibrado.
- Sentinel-1 no calibra calado urbano.
- El 2D propio es preliminar; el calado definitivo lo da HEC-RAS.

ClimaLAB · Reporte técnico generado por el agente CLIMALAB a partir de los resultados · CHIRPS, NASA NEX-GDDP-CMIP6, GEOGLOWS, HAND, INAMHI M0072, TROPOMI, HEC-HMS/RAS.