

Forzamiento climático para escenarios hidrológicos actuales y futuros en la cuenca Lerma-Santiago

Resumen técnico del panel de control de flujo ambiental
International Water Management Institute (IWMI)

Septiembre de 2026

Tabla de contenido

1. Propósito y alcance	3
2. Forzamiento climático de referencia (1992–2024)	3
3. Conjunto de datos climáticos futuros y escenarios de emisiones	3
4. Selección del conjunto de modelos climáticos	4
5. De los campos climáticos a los escenarios de descarga.....	5
6. Cambios proyectados y dispersión del conjunto.....	5
7. Incertidumbre y uso apropiado.....	6
Referencias	7

Lista de tablas

Tabla 1. Los ocho modelos CMIP6 seleccionados para forzar los escenarios hidrológicos futuros.	4
Tabla 2. Cambio mediano del conjunto en el caudal, 2071–2100 en relación con 2015–2044, con dispersión intermodelo indicativa.	6

1. Propósito y alcance

Esta nota describe el forzamiento climático utilizado para generar los escenarios de descarga futuros que se muestran en el panel de control de caudales ambientales para la cuenca Lerma-Santiago: el forzamiento observacional de la línea base histórica, el conjunto de datos CMIP6 a escala reducida y los escenarios de emisiones utilizados para las proyecciones, los criterios y la evidencia que respaldan la selección del conjunto de modelos climáticos, la forma en que los campos climáticos se convirtieron en simulaciones hidrológicas consistentes con la línea base calibrada, y los resultados principales con su incertidumbre asociada. Acompaña al resumen de la modelización hidrológica, que documenta el modelo de balance hídrico, el enrutamiento de los ríos, la representación de los embalses y el tratamiento de los datos hidrométricos.

2. Forzamiento climático de referencia (1992–2024)

La línea base histórica se fuerza con productos de observación: precipitación diaria CHIRPS v2.0 (Funk et al., 2015) corregida por sesgo con respecto a 315 pluviómetros controlados por calidad de la red climatológica nacional, y evapotranspiración diaria de referencia de pasto del producto de referencia global ET de NOAA/USGS (Hobbins et al., 2023). Estos productos se retuvieron después de una evaluación de forzamiento múltiple en la que cuatro conjuntos de datos de precipitación (CHIRPS v2.0 y v3.0, MSWEP v2.8, ERA5) y dos conjuntos de datos de demanda evaporativa (ET de referencia de NOAA, evaporación potencial GLEAM v4) se ejecutaron a través de la cadena de modelado completa y se evaluaron con respecto a la lluvia y descarga medidas. La precipitación anual media de la cuenca sobre la línea base es de aproximadamente 750–770 mm, de los cuales más del 80% cae en la temporada húmeda de junio a septiembre bajo el monzón norteamericano (NAM); Esta marcada estacionalidad, y su correcta sincronización, es la propiedad más importante que deben reproducir los factores futuros, ya que el inicio y el final del monzón controlan prácticamente toda la generación de escorrentía en la cuenca.

3. Conjunto de datos climáticos futuros y escenarios de emisiones

Las proyecciones futuras se fuerzan con el conjunto de datos de Proyecciones Diarias Globales a Escala Reducida de NASA Earth Exchange (NEX-GDDP-CMIP6, versión 2.0; Thrasher et al., 2022). NEX-GDDP-CMIP6 proporciona campos meteorológicos diarios de los modelos climáticos globales (GCM) CMIP6, reducidos estadísticamente a 0.25° (aproximadamente 25 km) y corregidos por sesgo con respecto a una climatología observacional mediante mapeo de cuantiles, lo que hace que el producto sea directamente utilizable para el modelado de impacto hidrológico al tiempo que conserva la señal de cambio climático de cada modelo. Se simulieron tres escenarios de Vías Socioeconómicas Compartidas para el período 2015-2100: SSP1-2.6 (bajas emisiones), SSP2-4.5 (intermedio) y SSP5-8.5 (muy alto), que abarcan el rango plausible de trayectorias de forzamiento radiativo evaluadas por el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (O'Neill et al., 2016). Se extrajeron los datos de precipitación diaria y los campos necesarios para derivar la evapotranspiración de referencia para cada modelo y escenario, y se remuestrearon a la cuadrícula del modelo hidrológico.

4. Selección del conjunto de modelos climáticos

No todos los modelos CMIP6 son igualmente adecuados para esta cuenca: muchos comparten el mismo código, por lo que usarlos juntos infla el consenso aparente sin agregar información independiente (Knutti et al., 2017), y varios tienen una sensibilidad climática de equilibrio (ECS) muy por encima del rango probable del IPCC AR6 de 2.5–4.0 °C, lo que inflaría sistemáticamente la demanda evaporativa futura y deprimiría la descarga proyectada más allá de los límites plausibles (Merrifield et al., 2023). De los 20 modelos disponibles en NEX-GDDP-CMIP6, se seleccionaron ocho a través de una revisión estructurada de la literatura aplicando cuatro criterios: (i) desempeño hidroclimático regional, principalmente la capacidad de reproducir la estacionalidad de la precipitación NAM (Ye & Wang, 2023) y desempeño validado sobre México (Andrade-Velázquez et al., 2023a, 2023b; Cruz-González et al., 2025); (ii) plausibilidad física, conservando solo modelos con ECS dentro o cerca del rango probable del AR6; (iii) independencia del modelo, un modelo por linaje institucional, prefiriendo el miembro de mayor resolución; y (iv) dispersión del conjunto, de modo que el subconjunto abarque el rango plausible de precipitación y calentamiento futuros en lugar de converger en unos pocos modelos similares. La Tabla 1 enumera el conjunto retenido. La precipitación, más que la temperatura, domina la incertidumbre en las proyecciones de esorrentía basadas en CMIP6 —alrededor del 93% del total (Miao et al., 2024)— razón por la cual el desempeño de la precipitación tuvo el mayor peso en la selección.

Tabla 1 Los ocho modelos CMIP6 seleccionados para forzar los escenarios hidrológicos futuros.

Modelo	ECS (°C)	evidencia de selección principal
NorESM2-MM	≈2.5	Clasificado como bueno para la estacionalidad del NAM (Ye & Wang, 2023); fuerte habilidad para precipitaciones extremas en regímenes áridos y tropicales; miembro extremo de baja sensibilidad.
GFDL-ESM4	≈2.7	Clasificado entre los mejores en variables de forzamiento hidrológico (precipitación, ET, humedad del suelo) en la evaluación CMIP6 específica de la aplicación (Adhikari et al., 2024).
MIROC6	≈2.6	Validado repetidamente en México con corrección de mapeo de cuantiles (Andrade-Velázquez et al., 2023a, 2023b); linaje japonés independiente
MPI-ESM1-2-HR	≈3.0	El linaje distintivo de Max Planck aporta diversidad estructural; gran capacidad para predecir la precipitación a escala de cuenca en las evaluaciones de cuencas monzónicas.
RM-ESM2-0	≈3.2	Mejor precisión de temperatura antes y después de la corrección en México; aplicada en la zona alta de Lerma; mantenida condicionalmente debido a un sesgo húmedo documentado en la temporada de retirada del NAM, verificado en la cuenca antes de su uso.
ACCESO-ESM1-5	≈3.9	Aplicado directamente en las cabeceras superiores del Lerma (Cruz-González et al., 2025); representa el extremo de sequía intensa de las proyecciones regionales.
IPSL-CM6A-LR	≈4.6	Reducción de escala validada de precipitación y temperatura sobre México con tratamiento explícito de patrones orográficos relevantes para el Cinturón Volcánico Transmexicano.
Tierra EC3	≈4.3	Mayor capacidad de predicción de precipitaciones extremas en regímenes áridos; supera la prueba de sesgo del dominio de México (Almazroui et al., 2021); con IPSL-CM6A-LR, abarca el extremo cálido del conjunto.

Se excluyeron doce modelos, principalmente por presentar valores de ECS fuera del rango plausible (por ejemplo, CanESM5, $ECS \approx 5.6$ °C, y UKESM1-0-LL, $ECS \approx 5.3$ °C; ambos, sin embargo, muestran una capacidad genuina para predecir el monzón y se recomiendan como experimentos complementarios de prueba de estrés bajo el escenario SSP5-8.5), por sesgo documentado en las precipitaciones sobre el dominio de México, por redundancia institucional con un modelo retenido o por la ausencia de evidencia de validación regional. La justificación completa de cada modelo, junto con la bibliografía de apoyo, se documenta en la revisión de selección de modelos de CMIP6 preparada para el proyecto.

5. De los campos climáticos a los escenarios de descarga

Para cada una de las 24 combinaciones de escenario-modelo ($3 \text{ SSP} \times 8 \text{ GCM}$), los campos diarios a escala reducida se procesaron en forzamiento VegET en la cuadrícula del modelo y se ejecutó la cadena completa para 2015–2100: el balance hídrico VegET con el mismo conjunto de parámetros calibrados que la línea base histórica, mizuRoute para descarga naturalizada y mizuRoute-Lake para la configuración regulada con los mismos 58 cuerpos de agua representados. Mantener la calibración y la estructura del modelo fijas garantiza que las diferencias entre escenarios reflejen únicamente el forzamiento climático, no el reajuste. La descarga diaria simulada se agregó a series mensuales para el panel de control.

La corrección del sesgo estadístico estimada para el producto regulado de referencia en las estaciones de aforo de CONAGUA (véase el resumen del modelo hidrológico) se transfirió a las simulaciones futuras de forma que se conservara la señal: las climatologías de corrección se mantienen fijas en sus valores de 1992-2024, de modo que solo varía la anomalía simulada por cada modelo y escenario. Esto evita que la corrección atenúe o amplifique la señal del cambio climático, y las comprobaciones de diagnóstico confirman que el cambio corregido en el caudal sigue el cambio sin corregir en las 24 combinaciones. Al igual que en la línea base, el producto futuro naturalizado se deja sin corregir y se utiliza únicamente para derivar el régimen de referencia.

6. Cambios proyectados y dispersión del conjunto

La Tabla 2 resume el cambio mediano del conjunto en la descarga de la cuenca entre el horizonte lejano (2071–2100) y el horizonte cercano (2015–2044). Las proyecciones muestran una señal de sequía consistente que se escala con las emisiones, impulsada conjuntamente por la reducción de las precipitaciones monzónicas y el aumento de la demanda evaporativa. La dispersión entre modelos es sustancial y, bajo SSP1-2.6, supera la señal del escenario en sí: los modelos individuales varían desde una humectación moderada (MPI-ESM1-2-HR, alrededor de +15%) hasta una sequía marcada (EC-Earth3, alrededor de –24%) bajo ese escenario, mientras que la trayectoria individual más seca en todo el conjunto (ACCESS-ESM1-5 bajo SSP5-8.5, alrededor de –81%) debe interpretarse como un miembro de baja probabilidad y alto impacto en lugar de una estimación central. Por esta razón, el panel presenta la mediana del conjunto junto con el rango entre modelos, y se recomienda a los usuarios que traten la dispersión, no ningún modelo individual, como la proyección.

Tabla 2el caudal, 2071–2100 en relación con 2015–2044, con dispersión intermodelo indicativa.

Guión	Cambio medio en el alta	Carácter del conjunto
SSP1-2.6 (bajo)	-10.3%	Dispersión mayor que la señal; modelos individuales desde $\approx +15\%$ hasta $\approx -24\%$
SSP2-4.5 (intermedio)	-18.9%	Secado uniforme en la mayoría de los modelos; propagación moderada
SSP5-8.5 (muy alto)	-43.8%	Secado fuerte y robusto; miembro más seco $\approx -81\%$ (ACCESS-ESM1-5)

7. Incertidumbre y uso apropiado

Tres advertencias enmarcan la interpretación de los escenarios. Primero, la incertidumbre de la precipitación es dominante: las diferencias entre los GCM en el comportamiento del monzón se traducen directamente en diferencias de escorrentía, y una tendencia documentada del CMIP6 a extender las lluvias monzónicas demasiado hacia la temporada de retirada (Ye & Wang, 2023) significa que los flujos de final de temporada son la parte menos segura de los hidrogramas proyectados. Segundo, la reducción de escala estadística y la corrección del sesgo del mapeo de cuantiles mejoran el realismo local, pero pueden distorsionar los extremos de precipitación y la coherencia espacial (Maraun, 2013), por lo que los cambios proyectados en los extremos a escala de inundación deben interpretarse con más cautela que los cambios en los volúmenes estacionales y anuales. Tercero, las proyecciones heredan las limitaciones estructurales de la cadena hidrológica: la gestión del agua está representada por el comportamiento genérico de almacenamiento y liberación de embalses bajo la infraestructura actual, y no se simulan cambios futuros en la abstracción, el uso de la tierra o la política operativa. Por lo tanto, los escenarios se utilizan mejor para comparar cambios relativos entre horizontes y escenarios —el propósito que cumplen en la evaluación del flujo ambiental— en lugar de como pronósticos deterministas de descarga absoluta.

Referencias

- Adhikari, RK, Yilmaz, AG, Mainali, B., & Dyson, P. (2024). Evaluación del rendimiento de los modelos CMIP6 para su aplicación en estudios de modelización hidrológica: un estudio de caso de Australia. *Science of the Total Environment*, 945, 174015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174015>
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, MN, & Ismail, M. (2021). Cambios proyectados en la temperatura y la precipitación sobre Estados Unidos, Centroamérica y el Caribe en los modelos climáticos globales CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 5, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>
- Andrade-Velázquez, M., Ávalos-Bravo, V., Maya-Magaña, ME, & Salinas-Prieto, JA (2023a). Tendencias históricas y proyectadas de la temperatura superficial media en el sur-sureste de México utilizando ERA5 y CMIP6. *Climate*, 11(5), 111. <https://doi.org/10.3390/cli11050111>
- Andrade-Velazquez, M., Avalos-Bravo, V., Maya-Magaña, ME y Salinas-Prieto, JA (2023b). Reducción de escala estadística de la precipitación en el sur y sureste de México. *Climate*, 11(9), 186. <https://doi.org/10.3390/cli11090186>
- Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Soria-Ruiz, J., Sánchez-Cohen, I., Monterroso-Rivas, AI, & Quevedo-Nolasco, A. (2025). Proyecciones de cambio climático en temperatura y precipitación mediante CMIP6 en el Centro de México. *Climatología Teórica y Aplicada*, 156, 97
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., y Michaelsen, J. (2015). Los riesgos climáticos de la precipitación infrarroja con estaciones: un nuevo registro ambiental para el monitoreo de extremos. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Hobbins, M., Harrison, L., Blakeley, S., et al. (2023). Un conjunto de datos de evapotranspiración de referencia global para apoyar el monitoreo de la sequía y la modelización hidrológica. *Scientific Data*, 10, 703. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02648-4>
- Knutti, R., Sedláček, J., Sanderson, BM, Lorenz, R., Fischer, EM y Eyring, V. (2017). Un esquema de ponderación de proyecciones de modelos climáticos que considera el rendimiento y la interdependencia. *Geophysical Research Letters*, 44(4), 1909–1918. <https://doi.org/10.1002/2016GL072012>
- Maraun, D. (2013). Corrección de sesgos, mapeo de cuantiles y reducción de escala: una revisión del problema de la inflación. *Journal of Climate*, 26(6), 2137–2143. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00821.1>
- Merrifield, AL, Brunner, L., Lorenz, R., Humphrey, V., & Knutti, R. (2023). Selección de modelos climáticos por independencia, rendimiento y dispersión (ClimSIPS v1.0.1) para aplicaciones regionales. *Geoscientific Model Development*, 16, 4715–4747. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4715-2023>
- Miao, C., Wu, Y., Slater, L., Lu, Q., & Su, T. (2024). Proyecciones hidrológicas bajo CMIP5 y CMIP6: Fuentes y magnitud de la incertidumbre. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(1), E59–E74. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0104.1>
- O'Neill, BC, Tebaldi, C., Van Vuuren, DP, Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, GA, Moss, R., Riahi, K. y Sanderson, BM (2016). El Proyecto de Intercomparación de Modelos de Escenarios (ScenarioMIP) para CMIP6. *Desarrollo de modelos geocientíficos*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). Proyecciones diarias globales a escala reducida de la NASA, CMIP6. *Scientific Data*, 9, 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- Ye, J., & Wang, Z. (2023). Un origen de los sesgos en el retroceso del monzón norteamericano en los modelos climáticos. *Journal of Climate*, 36(14), 4663–4676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0592.1>