

# EL FENÓMENO EL NIÑO Y LA HUELLA HÍDRICA EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ: CUANDO EL AUMENTO DE LA DISPONIBILIDAD NO DISMINUYE LA ESCASEZ

Joan Sanchez-Matos\*, Ian Vázquez-Rowe  
Ramzy Kahhat

Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN), Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Avenida Universitaria 1801, San Miguel 15088, Lima, Perú

\*Autor de correspondencia:  
sanchez.joan@pucp.edu.pe



Joan Sanchez Matos es ingeniero en Gestión Ambiental por la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP). Cuenta con un máster en Contaminación Industrial por la Universidad de Vigo (Galicia, España) y un doctorado en Desarrollo y Ambiente por la Universidade Estadual de Santa Cruz (Bahía, Brasil). Actualmente se desempeña como investigador postdoctoral en la Red Peruana de Análisis de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Sus líneas de investigación se centran en la ecología industrial, el desarrollo de nuevas métricas de Análisis de Ciclo de Vida, como la escasez hídrica o la eutrofización, así como en la evaluación del impacto ambiental de productos agrícolas, pesqueros y acuícolas.

**Palabras clave:** América Latina; Análisis de Ciclo de Vida; ecología industrial; economía circular; escasez de agua; región hiperárida.

Citar como: Sanchez-Matos, J., Vasquez-Rowe, I., Kahhat, R. (2025) El Fenómeno El Niño y la huella hídrica en la costa norte del Perú: cuando el aumento de la disponibilidad no disminuye la escasez. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 06, págs. 4-10.

## ¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?\*

Este estudio propone la mejora en la estimación de impactos de la escasez hídrica en la zona norte del Perú en un contexto de Fenómeno El Niño. Esto es relevante dados los factores de caracterización y la importancia del recurso hídrico en el sector económico agrícola. La investigación destaca la precisión alcanzada, para representar el impacto de la escasez de agua a pesar del aumento de las lluvias y caudales de ríos. Por lo tanto, dada la alta importancia estratégica de la costa norte, se recomienda fortalecer la infraestructura hidráulica para un adecuado sistema de captación y almacenamiento. Finalmente, promover las medidas de adaptación de la población ante eventos hidrológicos extremos durante El Niño.

## Resumen

La escasez hídrica en el Perú se intensificará debido al cambio climático y al incremento sostenido de la demanda humana, especialmente en regiones vulnerables como la costa, donde la alta demanda y baja disponibilidad hídricas, además del Fenómeno El Niño (FEN) agravan la situación. Esta complejidad

territorial limita la aplicabilidad de modelos globales para representar adecuadamente la escasez hídrica a nivel local. Por otro lado, la huella hídrica, derivada del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), permite estimar impactos ambientales relacionados con la cantidad y calidad del agua utilizada en el ciclo de vida de productos. Para cuantificar estos impactos, se utilizan factores de caracterización (FdC) basados en modelos

de escasez hídrica, siendo AWARE (Available Water Remaining) el modelo de consenso actual. Sin embargo, este presenta limitaciones en zonas donde la demanda supera la disponibilidad, como en la costa hiperárida del Perú. Este estudio propone actualizar los FdC para cuencas de la costa norte peruana, utilizando el modelo AWARE, usando datos locales y considerando además escenarios específicos del FEN. Para ello, se emplearon bases de datos oficiales sobre disponibilidad, demanda y la delimitación oficial de cuencas. Así mismo, los FdC durante el FEN se estimaron retrospectivamente a partir de información histórica. Los resultados muestran diferencias entre los FdC originales y los actualizados, debido principalmente a la baja resolución espacial de los datos globales. Además, los nuevos FdC actualizados resultaron hasta 12 veces mayores que los originales. Por otro lado, durante el FEN, los FdC mensualizados fueron menores a los obtenidos con promedios históricos, lo que sugiere una posible subestimación del impacto real de la escasez hídrica. Finalmente, estos nuevos FdC mejoran la precisión en la estimación del impacto de escasez hídrica, especialmente en productos agrícolas, que constituyen un consumo importante en la costa peruana. Además, se evidencia que, a pesar del aumento de caudales en ciertas zonas durante el FEN, este incremento no garantiza la satisfacción de la demanda hídrica, y por el contrario, agrava los problemas en los sistemas de abastecimiento humano, debido a una baja capacidad de adaptación de estos.

## 1. Introducción

La escasez hídrica ocurre cuando la demanda supera la disponibilidad hídrica (He et al., 2021), una problemática cada vez más grave debido por el impacto de las actividades humanas, la contaminación y el cambio climático (Blöschl & Chaffe, 2023). Al día de hoy, se estima que un tercio de la población mundial ya enfrenta condiciones severas de escasez (Mekonnen & Hoekstra, 2016), habiéndose sobrepasado el límite planetario del uso de agua dulce (Richardson et al., 2023).

En Perú, a pesar de su relevante aporte de agua dulce en Sudamérica, y la existencia de una gran cantidad de reservorios (ANA, 2016), la región costera del Pacífico enfrenta una alta presión humana sobre sus recursos hídricos. Esta situación se debe a su aridez y a la creciente demanda humana, especialmente en agricultura (Esteve-Llorens et al., 2022) y a fenómenos climáticos como el Fenómeno El Niño

(FEN) al ejercer este una influencia en el régimen de lluvias estacionales en el Perú (Lavado & Espinoza, 2014), que altera la disponibilidad de agua de manera irregular. Estas alteraciones provocan daños en infraestructuras de abastecimiento y áreas agrícolas (Parodi et al., 2021; Ramírez & Lee, 2022). En particular, la agricultura de exportación en la costa peruana —arándanos, espárragos y paltas (aguacates)— ha experimentado un incremento, intensificando el consumo de agua (Esteve-Llorens et al., 2022; Raihan & Tuspekova, 2022). Para enfrentar este contexto, el gobierno peruano condujo la creación del "Certificado Azul" en 2015, una certificación nacional que promueve la medición y la reducción de la huella hídrica, con base a estándares internacionales como la norma ISO 14046 o la guía de Water Footprint Network (WFN) (ANA, 2015). Particularmente, el cálculo de la huella hídrica basado en la ISO 14046 considera un enfoque de impacto ambiental de ciclo de vida, a diferencia del enfoque de WFN, que considera consumos de agua en volúmenes de agua azul, verde o gris (Martínez-Arce et al., 2018).

La huella hídrica basada en un enfoque de impacto ambiental, considera el método de consenso Available Water Remaining (AWARE) (Boulay et al., 2018). Sin embargo, los factores de caracterización (FdC) usados en el método AWARE para medir la escasez hídrica presentan elevadas incertidumbres en ciertas regiones del planeta, porque se basan en bases de datos globales difícilmente adaptadas a la realidad de países como el Perú (Boulay et al., 2021). Diversos estudios han demostrado la necesidad de adaptar los FdC a la realidad hidrológica local, especialmente considerando eventos como el FEN (Sanchez-Matos et al., 2023; Vázquez-Rowe et al., 2017).

En este contexto, el presente estudio propone una actualización metodológica para recalcular los FdC del modelo AWARE en Perú usando datos más precisos, además de estimar FdC incorporando los efectos de FEN. Se tiene como objetivo, de este modo, analizar cómo las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica pueden afectar los valores de escasez hídrica en la costa norte del Perú.

## 2. Metodología

El cálculo de los FdC actualizados se realizó siguiendo el método AWARE, el cual mide la escasez hídrica considerando el volumen de agua disponible una vez satisfechas las necesidades humanas y ecológicas de

cada cuenca (AMDi, availability minus demand) (Boulay et al., 2018). De acuerdo con el método AWARE, la disponibilidad hídrica es el agua de escorrentía de una cuenca después de las intervenciones humanas (Boulay et al., 2018). Los FdC mensuales fueron calculados a través de la inversa de AMDi, normalizada respecto al promedio global mensualizado de esta variable. Así, los FdC indican cuánta agua queda disponible en una región comparado con el promedio mundial. Este método considera un criterio de corte del FdC entre 0,1 y 100 (m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>).

Para actualizar los FdC en la región de estudio, se seleccionaron cuencas hidrográficas del norte del Perú como caso de análisis (Figura 1a). Para ello se usaron nuevas fuentes de datos: se adoptaron unidades hidrográficas oficiales (ANA, 2008), en lugar de la escala original (0.5°x0.5°). Además, se reemplazaron los datos de disponibilidad de agua de WaterGAP2.2 (Müller Schmied et al., 2014) por estimaciones basadas en registros históricos del SENAMHI (Lavado-Casimiro et al., 2021). Para representar la demanda humana, se utilizaron derechos de uso del agua, excepto para el uso doméstico, el cual se calculó con datos demográficos y de consumo per cápita (SUNASS, 2004). Además, debido a que la delimitación original de cuencas de AWARE difiere geográficamente con las cuencas delimitadas oficialmente (ANA, 2008), la comparación entre los valores de FdC recalculados con los originales se limitó exclusivamente para la cuenca del río Piura y la cuenca AWARE 55852 (Figura 2).

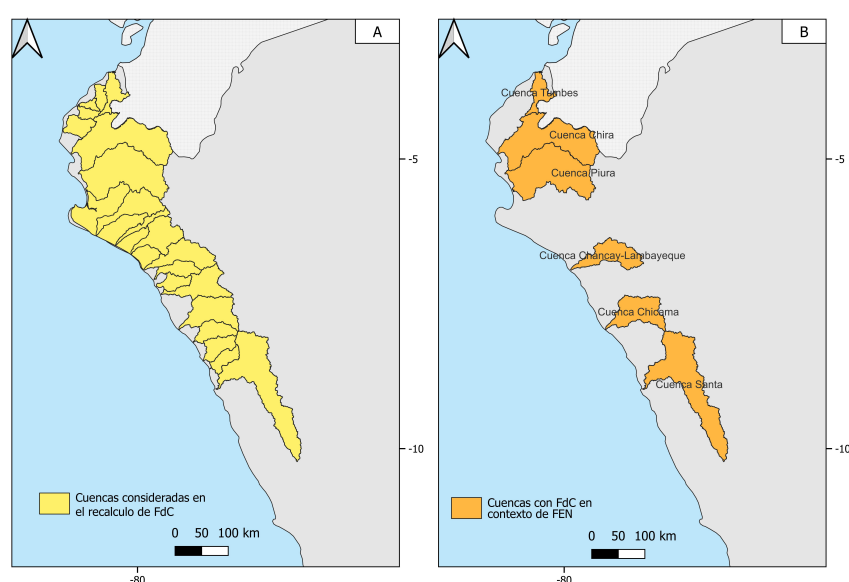
Por otro lado, para calcular los FdC durante el FEN, se seleccionaron seis cuencas de la costa norte del Perú, considerándose las altamente sensibles a este fenómeno: Tumbes, Piura, Chira, Chancay-Lambayeque, Santa y Chicama (Figura 1b). Esta decisión se basó en el monitoreo histórico de las cuencas y en el aumento de hasta 400 % en sus caudales promedio durante eventos El Niño (Lavado-Casimiro et al., 2013), y debido a que han sido catalogadas entre las más afectadas en términos de impacto poblacional registrado durante el FEN de 2017 (Ramírez & Briones, 2017).

Así mismo, se consideraron los periodos considerados como El Niño de al menos doce meses de duración y el Niño Costero de 2017. La disponibilidad de agua se obtuvo de datos históricos de estaciones hidrométricas (IGP, 2023; Llauca et al., 2021). Para estimar las demandas humanas de agua, se adoptó un enfoque retrospectivo: se calculó a partir de la población de cada año (INEI, 1998b, 2021b) y el consumo promedio de agua (SUNASS, 2004). Las demandas agrícola y pecuaria se estimaron proporcionalmente al área cultivada según datos oficiales (INEI, 1998a, 2008, 2013, 2021a), y la demanda industrial se vinculó al producto bruto interno (PIB) del sector manufacturero, considerando la relación entre PBI y consumo de agua (Boretti & Rosa, 2019; Chu et al., 2022).

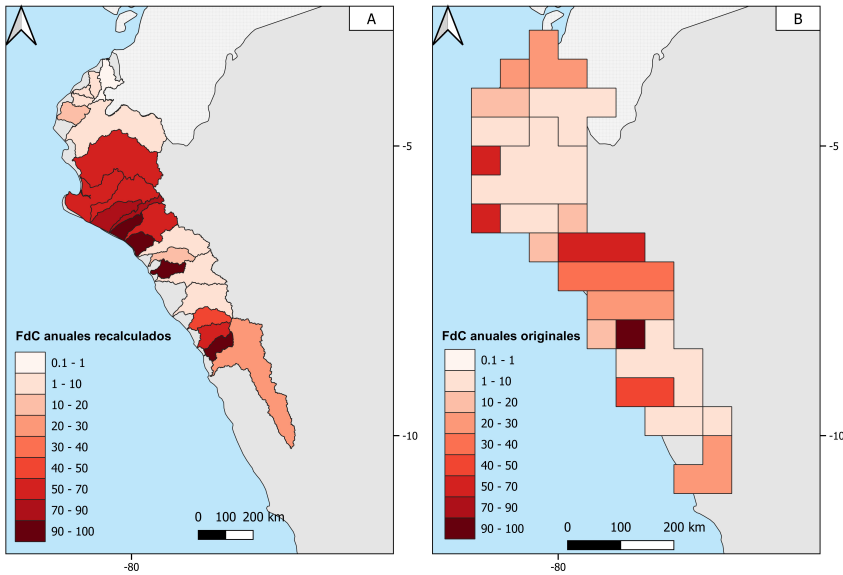
### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Comparación entre factores de caracterización (FdC) originales y recalculados

Los resultados revelaron diferencias tanto en la delimitación espacial de las cuencas como en los niveles de escasez hídrica estimados (Figura 2). Un caso ilustrativo de comparación directa es la cuenca del río Piura, la cual puede ser directamente comparada con la cuenca AWARE 55852. En esta zona, el FdC anual recalculado alcanzó un valor de 59.7 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>, es decir, hasta doce veces al valor original (4.8 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>). Este hallazgo sugiere que el uso de los FdC originales podría subestimar el verdadero nivel de la escasez hídrica en la costa norte peruana.

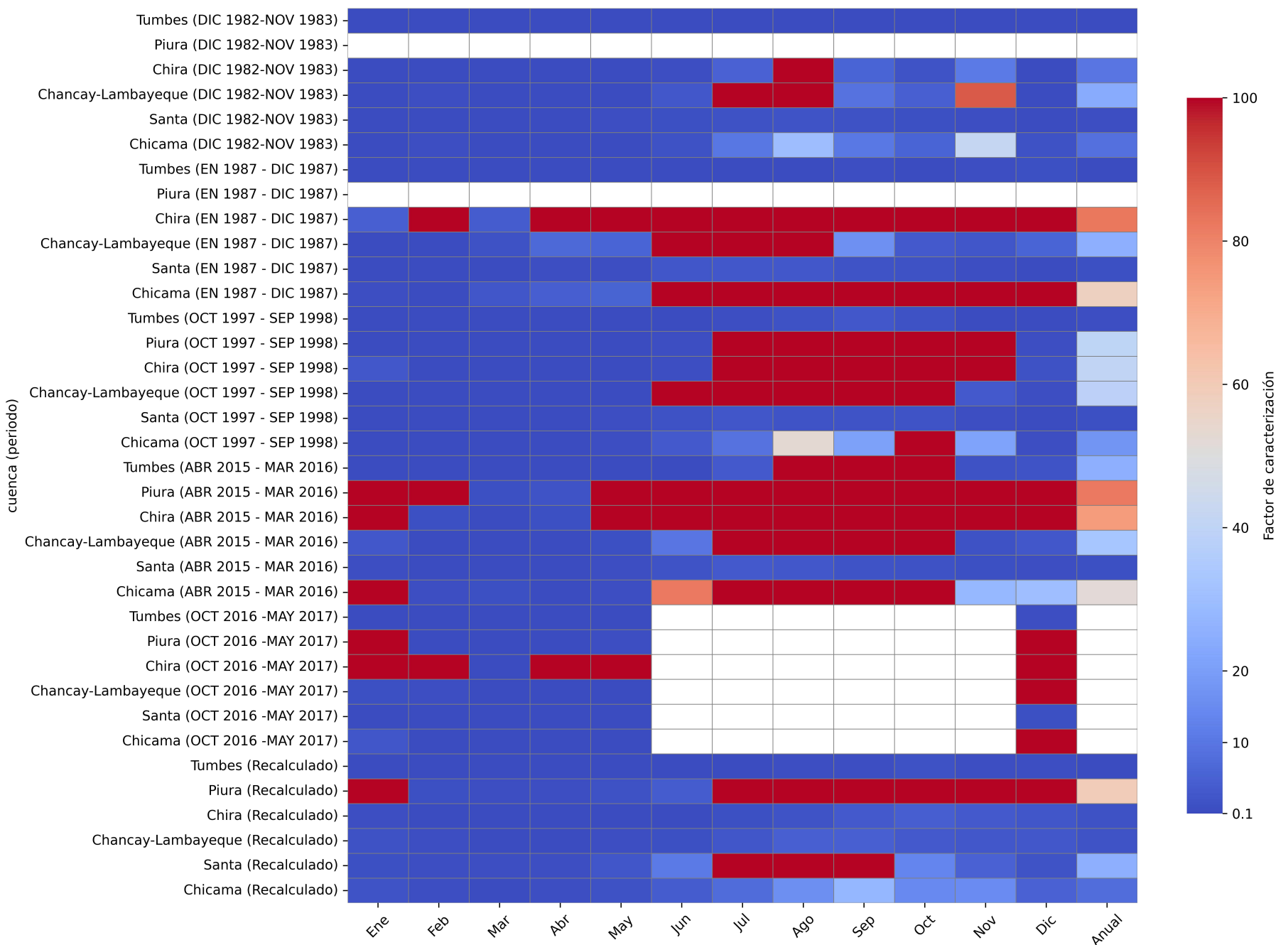


**Figura 1.** Cuencas de la Costa Norte del Perú consideradas en el recálculo de los factores de caracterización (FdC) de escasez hídrica (A), y cuencas consideradas en el desarrollo de FdC considerando el Fenómeno El Niño (B).



**Figura 2.** Comparación entre los factores de caracterización (FdC) anuales de escasez hídrica recalculados para condiciones peruanas (A) y FdC anuales originales del método AWARE (B). Nota: todos los factores de caracterización son expresados en m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>. Nota: Valores más cercanos a 100 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan mayor escasez hídrica, por el contrario, valores más cercanos a 0.1 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan baja escasez hídrica.

Estas discrepancias en los resultados se deben principalmente a las fuentes de datos usadas por ambos enfoques. El enfoque actualizado emplea datos de derechos de uso de agua para uso agrícola (principalmente licencias permanentes, que representan el 97 % de los retiros agrícolas), mientras que WaterGAP modela la demanda basado en dos tipos de cultivos, categorizados como arroz y otros cultivos (Döll & Siebert, 2002; Siebert et al., 1999). Así mismo, en cuanto a la disponibilidad hídrica, el presente estudio utilizó el modelo SWAT calibrado con datos locales de estaciones hidrométricas para el periodo 1981–2016 (Lavado-Casimiro et al., 2021), a diferencia del AWARE, que emplea WaterGAP2.2 basado en datos globales de precipitación y evapotranspiración. En consecuencia, el enfoque actualizado refleja de manera más precisa la demanda agrícola real durante todo el año, mientras que el modelo original subestima la escasez en muchos meses secos.



**Figura 3.** Comparación entre los factores de caracterización (FdC) mensualizados y anualizados considerando los periodos del Fenómeno El Niño (FEN) y los FdC recalculados. Nota: Valores más cercanos a 100 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan mayor escasez hídrica, por el contrario, valores más cercanos a 0.1 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan baja escasez hídrica. Los valores en blanco, representan meses sin registro.

### 3.2 Comparación entre factores de caracterización (FdC) originales y recalculados

Durante eventos fuertes de FEN (excepto en 2015/2016 y 2016/2017), los FdC de los meses de febrero a abril presentan los menores niveles de escasez hídrica en la costa norte (Figura 3). Marzo destaca como el mes con el menor déficit en todas las cuencas hídricas evaluadas, coincidiendo con el periodo de aumento de lluvias y disponibilidad de agua entre los meses de diciembre y mayo. Además, todas las cuencas, con excepción de la cuenca Santa, presentaron menores FdC anuales promediados a partir de los años con evento FEN, que los FdC anuales recalculados, sugiriendo una subestimación de la escasez hídrica.

Según el análisis de los datos de disponibilidad hídrica de las estaciones hidrométricas proporcionados por Llauca et al. (2021), los eventos FEN fuertes como los de 1982/1983 y 1997/1998 provocaron aumentos extremos del caudal en cuencas como Tumbes, Piura, Chicama y Santa, con incrementos de entre 12 a 69 veces respecto a los valores históricos. En el caso del Niño Costero de 2017, también se observaron incrementos sustanciales, particularmente en la cuenca del río Piura.

No obstante, el aumento en la disponibilidad de agua durante los FEN, provocan inundaciones, causando daños significativos, afectando tanto al suministro doméstico como agrícola, y por lo tanto afectando a la demanda hídrica humana. Por ejemplo, en el FEN de 2017, la planta de tratamiento de agua de Lima suspendió su operación por varios días debido al incremento de la turbidez en el río Rímac (Bell, 2022), además de generar daños en miles de hectáreas agrícolas a lo largo de la costa peruana (Parodi et al., 2021). Este contexto evidencia que un incremento en la disponibilidad hídrica no necesariamente se traslada en una reducción real de la escasez hídrica, ya que los daños debido a una baja capacidad de adaptación de los sistemas de colecta, tratamiento y distribución de agua para consumo humano y uso agrícola, serían superiores a los beneficios de un incremento repentino en los caudales de los cuerpos de agua dulce durante el FEN.

En este sentido, dado que los FdC suelen calcularse considerando promedios de al menos 20 años de

registros históricos, estos podrían no representar adecuadamente los eventos de alta disponibilidad hídrica. Por ello, se sugiere desarrollar FdC adaptados a ventanas temporales más cortas para capturar mejor los cambios durante los FEN, y evitar una subestimación de la escasez hídrica en zonas con alta variabilidad de precipitación. Además, se sugiere la actualización periódica de los FdC, lo que permitiría reducir la incertidumbre en los valores de escasez hídrica, por el efecto del progresivo cambio de uso de suelo en la disponibilidad hídrica (Zorogastúa-Cruz et al., 2011).

## 4. Conclusiones

Los FdC actualizados mejoran sustancialmente la representatividad de la huella hídrica en el Perú, al incorporar datos primarios regionales que capturan con mejor precisión la variabilidad espacial y temporal de disponibilidad y demanda de agua, superando las limitaciones del modelo original. Esta mejora resulta particularmente relevante en la costa norte hiperárida, donde la escasez hídrica es crítica. Los resultados muestran que los FdC son altamente sensibles a los eventos FEN. En este sentido, se recomienda aplicar criterios diferenciados al calcular huellas de escasez hídrica en zonas sensibles al FEN, a fin de evitar errores en la estimación de impactos de escasez hídrica, especialmente de productos agrícolas.

Además, dada la importancia estratégica de la costa norte del Perú —tanto por su densidad poblacional como por su aporte agrícola—, resulta imperativo adoptar distintas dinámicas para minimizar los daños y potenciar los beneficios del incremento de la disponibilidad hídrica durante los FEN. Esto se podría lograr al fortalecer la infraestructura hidráulica de captación, almacenamiento y distribución, promover la formalización del uso de agua de usuarios informales, y desarrollar e implementar medidas de adaptación frente a eventos extremos hídricos.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Ejecutiva de Investigación Europea (the European Research Executive Agency) por financiar el Proyecto BAMBOO (101059379). El Dr. Joan Sanchez-Matos desea agradecer al DFI-PUCP por financiar su estancia de investigación postdoctoral a través del programa Estancias Postdoctorales PUCP 2023.

## Referencias

- Autoridad Nacional del Agua. (2008). Delimitación y codificación de las unidades hidrográficas del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/597>
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). Resolución Jefatural N° 246 de 2015: Por la cual se promueve la medición voluntaria de la Huella Hídrica. <https://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-ndeg-246-2015-ana-0>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Inventario de Presas del Perú: Primera parte - 2015. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/200>
- Bell, M. G. (2022). Overlooked legacies: Climate vulnerability and risk as incrementally constructed in the municipal drinking water system of Lima, Peru (1578–2017). *Geoforum*, 132, 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.02.016>
- Blöschl, G., & Chaffe, P. L. B. (2023). Water scarcity is exacerbated in the south. *Science*, 382(6670), 512–513. <https://doi.org/10.1126/science.adk8164>
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Boulay, A. M., Lesage, P., Amor, B., & Pfister, S. (2021). Quantifying uncertainty for AWARE characterization factors. *Journal of Industrial Ecology*, 25(6), 1588–1601. <https://doi.org/10.1111/jiec.13173>
- Chu, Y., Wang, Y., Zhang, Z., & Dai, S. (2022). Decoupling of Economic Growth and Industrial Water Use in Hubei Province: From an Ecological–Economic Interaction Perspective. *Sustainability*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013338>
- Döll, P., & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4), 1037. <https://doi.org/10.1029/2001wr000355>
- Esteve-Llorens, X., Ita-Nagy, D., Parodi, E., González-García, S., Moreira, M. T., Feijoo, G., & Vázquez-Rowe, I. (2022). Environmental footprint of critical agro-export products in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for green asparagus and avocado. *Science of the Total Environment*, 818, 151686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151686>
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12(1), 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Instituto Geofísico Del Perú. (2023). Eventos El Niño y La Niña Costeros. [http://met.igp.gob.pe/elniño/lista\\_eventos\\_ICEN\\_ERSSTv3b.html](http://met.igp.gob.pe/elniño/lista_eventos_ICEN_ERSSTv3b.html)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1998a). Agropecuario. En Compendio estadístico 1996-97. <https://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/LIB0170/N46/N46.htm>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1998b). Población. En Compendio estadístico 1996-97. <https://doi.org/https://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0170/n00.htm>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2008). Agrario. En Perú: Compendio Estadístico 2008. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib0808/Libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0808/Libro.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2013). Agrario. En Compendio Estadístico del Perú 2013. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1097/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1097/libro.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2021a). Agrario. En Compendio Estadístico: Perú 2021. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/3000248-compendio-estadistico-peru-2021>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2021b). Población. En Compendio Estadístico: Perú 2021. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/3000248-compendio-estadistico-peru-2021>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046: Environmental management — Water footprint — Principles, requirements, and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:en>
- Lavado-Casimiro, W., Felipe, O., Silvestre, E., & Bourrel, L. (2013). ENSO impact on hydrology in Peru. *Advances in Geosciences*, 33, 33–39. <https://doi.org/10.5194/adgeo-33-33-2013>

- Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El niño y La niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 171–182. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003>
- Lavado-Casimiro, W., Traverso, K., & Gutierrez, L. (2021). Atlas de Hidrología superficial del Perú - Una evaluación presente y futura. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1252>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., & Rau, P. (2021). PISCO\_HyM\_GR2M: A model of monthly water balance in Peru (1981–2020). *Water*, 13(8), 1048. <https://doi.org/10.3390/w13081048>
- Martínez-Arce A, Chargoy JP, Puerto M, et al (2018) Water footprint (ISO 14046) in latin america, state of the art and recommendations for assessment and communication. *Environments*, 5, 1–16. <https://doi.org/10.3390/environments5110114>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Müller Schmied, H., Eisner, S., Franz, D., Wattenbach, M., Portmann, F. T., Flörke, M., & Döll, P. (2014). Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3511–3538. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3511-2014>
- Parodi, E., Kahhat, R., & Vázquez-Rowe, I. (2021). Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of El Niño flood disasters in Peru. *Climate Risk Management*, 33, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, 6, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>
- Ramírez, I. J., & Briones, F. (2017). Understanding the El Niño Costero of 2017: The definition problem and challenges of climate forecasting and disaster responses. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(4), 489–492. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0151-8>
- Ramírez, I. J., & Lee, J. (2022). Deconstructing the spatial effects of El Niño and vulnerability on cholera rates in Peru: Wavelet and GIS analyses. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 40, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2021.100474>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Stefan, P., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L., & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Sanchez-Matos, J., Andrade, E. P., & Vázquez-Rowe, I. (2023). Revising regionalized water scarcity characterization factors for selected watersheds along the hyper-arid Peruvian coast using the AWARE method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(11), 1447–1465. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02195-5>
- Siebert, S., Döll, P., Feick, S., Hoogeveen, J., Faurès, J.-M., & Frenken, K. (1999). The Global Map of Irrigation Areas. FAO.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2004). La calidad del agua potable en el Perú. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1115225/Sunass\\_JICA\\_2004\\_La\\_calidad\\_del\\_agua\\_potable\\_en\\_el\\_Per%C3%BA..pdf?v=1596205266](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1115225/Sunass_JICA_2004_La_calidad_del_agua_potable_en_el_Per%C3%BA..pdf?v=1596205266)
- Vázquez-Rowe, I., Torres-García, J. R., Cáceres, A. L., Larrea-Gallegos, G., Quispe, I., & Kahhat, R. (2017). Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for the cultivation of grapes for pisco production. *Science of the Total Environment*, 601–602, 532–542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.221>
- Zorogastua Cruz, P., Quiroz Guerra, R., & Garatuza Payán, J. (2011). Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura-Perú. *Ecología Aplicada*, 10(1-2), 13–22. <https://doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.409>