

# EL BALANCE HÍDRICO DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO PERUANO (1970 – 2008) EN EL CONTEXTO HIDROCLIMÁTICO

Pedro Rau<sup>1,2</sup>, Luc Bourrel<sup>2</sup>, David Labat<sup>2</sup>, Denis Ruelland<sup>3</sup> y Waldo Lavado<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Ingeniería y Tecnología UTEC. Departamento de Ingeniería Ambiental – CITA, Lima, Perú.

<sup>2</sup> UMR 5563 GET, Université de Toulouse – CNRS – IRD – OMP – CNES, Toulouse, Francia.

<sup>3</sup> CNRS, UMR 5569 HydroSciences Montpellier HSM, Montpellier, Francia.

<sup>4</sup> SENAMHI. Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, Lima, Perú.

E-mail: prau@utec.edu.pe

## Resumen extendido

El presente estudio busca comprender cuál es la evolución del balance hídrico en las cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico peruano frente a los efectos de cambios en el clima y en las cuencas (i.e. cambio hidroclimático). Estas dos temáticas de investigación son consideradas como prioritarias dentro de la comunidad hidrológica para la comprensión de la evolución del balance hídrico y la disponibilidad de agua bajo un enfoque hidroclimático.

Se propone un análisis exploratorio de los registros históricos de las variables climáticas de precipitación (P) y temperatura (T); y la variable hidrológica de la escorrentía (R) a escala de cuenca hidrográfica. Se utilizaron la información de 139 estaciones pluviométricas, 59 estaciones meteorológicas y 35 estaciones hidrológicas pertenecientes al SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) logrando establecer una red (ver Figura 1) a nivel mensual y anual en el periodo de 1970 al 2008. En base a un análisis de calidad y homogenización de datos, los caudales presentaron casos de incongruencia y alta incertidumbre, quedando restringido el análisis en 26 cuencas hidrográficas.

Se procedió a una agregación espacial de los datos climatológicos de P, T y a la estimación de la evapotranspiración potencial (PET) con el método de Oudin (Oudin et al., 2005). Este modelo está basado en la temperatura, tomando en cuenta la escasez de información y de condiciones de aridez de la zona de estudio. Dichas variables fueron interpoladas usando una grilla de 5 x 5 km mediante el método de la IDW modificada, mediante la incorporación del efecto orográfico usando el modelo de elevación digital SRTM (Ruelland et al., 2014) y el empleo de factores de corrección (Valery et al., 2010) obtenidos de los registros.

En una primera etapa, se analizaron las series hidroclimáticas a escala de tiempo anual, evidenciando un comportamiento regional de P y R con una notable influencia de los eventos extremos debido al fenómeno El Niño tales como los eventos de los años 1982/1983 y 1997/1998 en las cuencas del Norte. Se observó un mayor módulo anual en las cuencas del Norte-Centro para después disminuir hacia las cuencas del Sur. De esta forma se corroboran las condiciones semi-áridas a escala de cuenca hidrográfica. Las variables de T y PET siguen el gradiente latitudinal de disminución hacia el Sur con un incremento en las cuencas con predominancia de suelos desnudos (*bare ground*) o matorrales abiertos (*open shrubland*). A su vez, se realizó el análisis de tendencias (Mann 1945; Kendall 1975) y puntos de quiebre (Pettitt, 1979) de todas las series hidroclimatológicas.

En una segunda etapa, se propone el estudio del balance hídrico a escala de tiempo anual, el cual considera la ecuación de balance hídrico para la estimación de la evapotranspiración real (AET) y considerando una variación nula del almacenamiento de agua. Se analiza a profundidad la evolución de los índices de aridez (P/PET), índice de sequedad (PET/P) e índice

evaporativo (AET/P) dentro de un modelo de tipo Budyko (Budyko, 1974). Este modelo semi-empírico y de validez global considera que la energía y el agua disponible, son los principales factores para determinar el valor de la AET. Utilizamos una de las relaciones desarrolladas por Zhang et al. (2001) llamada Budyko-Zhang tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{AET}{P} = \frac{1 + w \left( \frac{PET}{P} \right)}{1 + w \left( \frac{PET}{P} \right) + \frac{P}{PET}} \quad [1]$$

Donde “w” es el coeficiente adimensional de agua disponible en las plantas de acuerdo al tipo de vegetación.

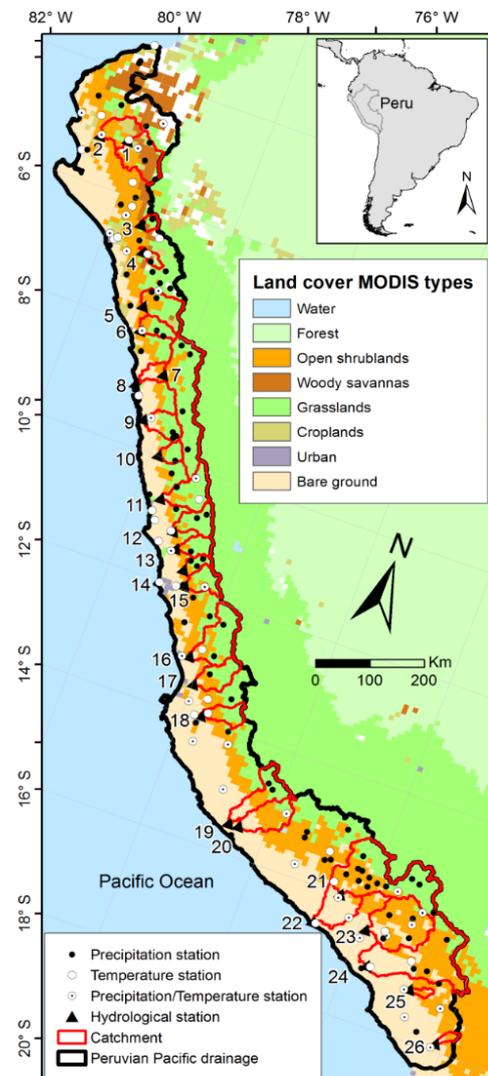
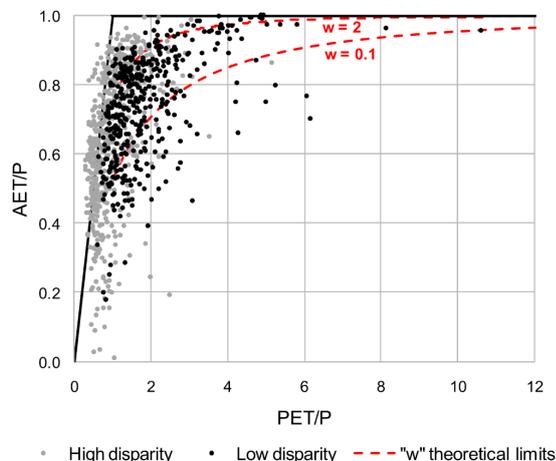


Figura 1.- Ubicación de las 26 cuencas hidrográficas estudiadas en la vertiente del Pacífico peruano, red de estaciones hidrometeorológicas y cobertura de suelo. (según Rau et al., 2017).

Este método evidenció el comportamiento de dos grupos de cuencas diferenciados a través del ajuste a la curva Budyko-Zhang mediante umbrales estadísticos. El primer grupo se ajustó estadísticamente a la curva, lo cual está relacionado a una respuesta hidrológica casi natural (ver Figura 2, puntos en negrita); y el segundo grupo no logró ajustarse a esta curva, lo cual está relacionado a otras influencias como a una fuerte actividad antropogénica, elevada incertidumbre en las mediciones u otros factores que alteran hidrológicamente dichas cuencas (ver Figura 2, puntos en gris).



**Figura 2.-** Espacio Budyko con los valores representados en puntos para todos los años del periodo 1970-2008 en las 26 cuencas. Las líneas en negro representan el límite de energía (diagonal) y el límite de agua (horizontal). Las curvas punteadas representan los ajustes límites teóricos para "w" ( $w_{min} = 0.1$  debajo de  $w_{max} = 2$ ).

Un total de 11 cuencas pudieron categorizarse teóricamente como sistemas con un comportamiento semi natural o con una menor antropogenización. Las 15 cuencas restantes presentarían una elevada antropogenización o unas características de alteración hidrológica fuerte afectando el balance hídrico incluso a escala de tiempo anual.

Estos resultados se sustentan y se validan mediante dos alcances:

**a) El cambio en la cuenca** a través del empleo de productos de teledetección como el LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Estos productos permiten la visualización y cuantificación de la evolución de la cobertura del suelo con información disponible entre 1984 y 2008. Se identificó un menor cambio de la cobertura del suelo durante dicho periodo en las 11 cuencas con menor antropogenización, a comparación con las 15 cuencas restantes. Estas últimas presentaron un incremento significativo en superficies del tipo pradera (*grassland*) y una disminución significativa del tipo tierras de cultivo (*cropland*), resultado muy relacionado con el contexto social histórico.

**b) El cambio en el clima** a través del análisis de las tendencias y quiebres, permitió identificar el comportamiento regional de la hidroclimatología en la zona de estudio por periodos de tiempo, resaltando un calentamiento promedio en la tasa de  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en todas las cuencas analizadas, así como la identificación de quiebres y tendencias en algunas variables hidroclimáticas.

La modificación del balance hídrico y de la respuesta hidrológica debido a este calentamiento y los procesos de cambios en las cuencas se traducen en una tendencia negativa de la escorrentía en las cuencas de la región Norte Centro, principalmente en cuencas de origen glacial y en cuencas con

intensa demanda por la actividad agrícola. Por otro lado, el incremento en la escorrentía en otras cuencas responde a la operación de trasvases y mega reservorios identificados.

## Referencias bibliográficas

**Budyko, M.I** (1974) Climate and Life. International Geophysics Series, vol. 18. Academic, New York.

**Kendall, M.G** (1975) Rank correlation measures. Charles Griffin, London.

**Mann, H.B** (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13: 245-259.

**Oudin, L., F. Hervieu., C. Michel., C. Perrin., V. Andréassian., F. Anctil and C. Loumagne** (2005) Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology* 303: 290-306.

**Pettitt, A.N** (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl Stat* 28: 126-135.

**Rau, P., L. Bourrel., D. Labat., F. Frappart., D. Ruelland., W. Lavado., B. Dewitte and O. Felipe** (2017) Hydroclimatic change disparity of Peruvian Pacific drainage catchments. *Theoretical and Applied Climatology*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2263-x>

**Ruelland, D., A. Dezetter and P. Hublart** (2014) Sensitivity analysis of hydrological modelling to climate forcing in a semi-arid mountainous catchment. In: *Hydrology in a changing world: environmental and human dimensions* (Proc. 7th FRIEND-Water Int. Conf., Montpellier, France, 7-10 Oct. 2014). IAHS Publ 363:145-150

**Valéry, A., V. Andréassian and C. Perrin** (2010) Regionalization of precipitation and air temperature over high-altitude catchments - learning from outliers. *Hydrological Sciences Journal* 55(6): 928-940.

**Zhang, L., W.R. Dawes and G.R. Walker** (2001) The response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701-708.