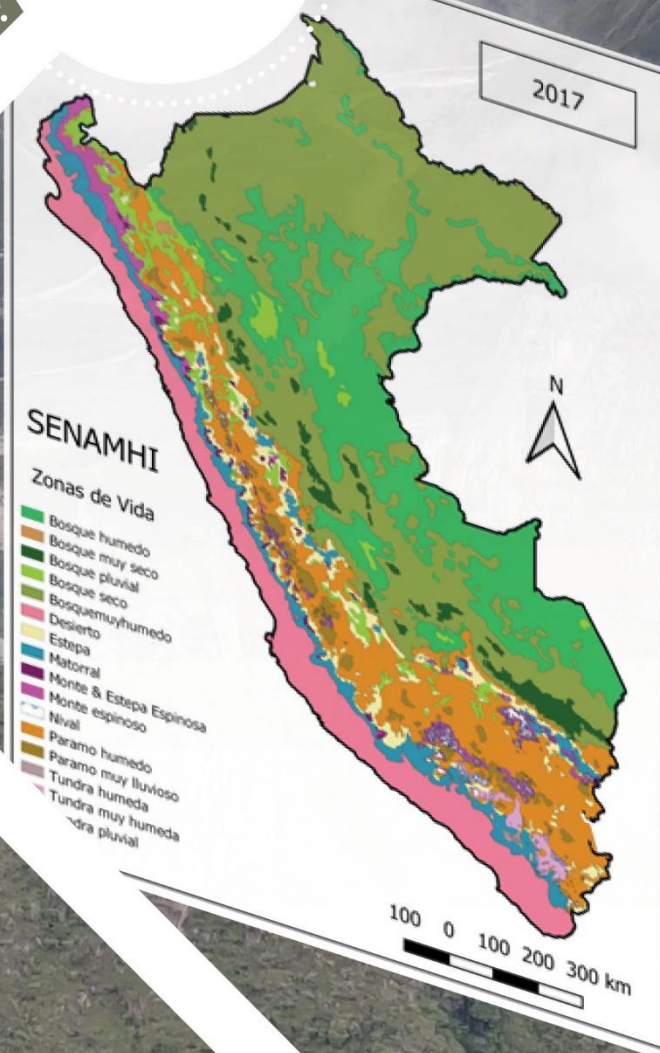


ESTIMACIÓN DE LAS ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE EN EL PERÚ

Formato: Artículo científico



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

EL PERÚ PRIMERO

ESTIMACIÓN DE LAS ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE EN EL PERÚ





DIRECTORIO

PhD. Ken Takahashi Guevara
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

REVISADO POR:

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

ELABORADO POR:

Ing. Evelin Sabino Rojas
Analista de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Lima-Perú
Diciembre - 2019

Citar como:

Sabino, E.; Lavado W. y Aybar C. Estimación de las zonas de vida de Holdridge en el Perú, formato: Artículo científico. Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología Del Perú –Senamhi. Dirección de Hidrología -DHI. Diciembre 2019.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
2.1 Área de estudio	3
2.2 Datos.....	4
2.2.1 Datos climáticos	4
2.2.2 Ratio de evapotranspiración	5
2.3 DEM	6
2.4 Diseño experimental	6
2.4.1 Zonas de vida de Holdridge.....	6
2.4.2 Procesamiento de datos	7
2.4.3 Predicción espacial	8
2.4.4 Metodología	9
3. RESULTADOS.....	14
4. CONCLUSIONES	16
5. AGRADECIMIENTOS.....	16
6. REFERENCIAS	16

Lista de Figuras

Figura 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para la predicción espacial de la precipitación y la biotemperatura	5
Figura 2. El sistema de las zonas de vida de Holdridge es uno de los más extendidos para la clasificación de los tipos de vegetación basados en el clima	7
Figura 3. Resultados finales de precipitación y biotemperatura multianual a 1 km de resolución	9
Figura 4. a) Variograma de los residuales de la precipitación multianual; b) Variograma de los residuales de la biotemperatura	9
Figura 5. Diagrama para la generación de las zonas de vida	12
Figura 6. Pisos Altitudinales y provincias de humedad del Perú	14
Figura 7. Porcentaje de áreas de las zonas de vida en el Perú y en sus 3 vertientes hidrográficas	15
Figura 8. Principales zonas de vida del Perú.....	15

Lista de Tablas

Tabla 1: Covariables utilizadas para la predicción espacial asociado a su fuente y/o algoritmo para su generación	8
Tabla 2: Relación del ratio de evapotranspiración potencial con.....	13

ESTIMACIÓN DE LAS ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE EN EL PERÚ

Evelin Sabino^{a1}, Waldo Lavado^{a2} y César Aybar

^a Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú

RESUMEN

Este estudio propone una actualización del Mapa de Zonas de Vida del Perú, asociadas a variables climáticas. Se generaron nuevas climatologías de precipitación y temperatura. Para esto se hizo un trabajo exhaustivo en el procesamiento de la información. A nivel nacional la distribución de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura no es homogénea, debido a la accesibilidad, para cubrir esta desigualdad se utilizó la covariable de TRMM2A25 y el análisis de componentes principales para el procesamiento de cada variable respectivamente. El criterio de clasificación para las zonas de vida se basó en Holdridge. El diagrama de Holdridge agrupa características meteorológicas y climáticas a escala regional de acuerdo con algunas reglas predefinidas. Se utilizó un método de agrupación espectral para identificar las características del clima local en el país. Para aumentar la proximidad del valor de las zonas de vida estimadas, los valores faltantes en los conjuntos de datos de las series de temperatura y precipitación se eliminaron mediante el variograma teórico apropiado. Se obtuvieron siete zonas de vida de categoría principales, basal, premontano, montano bajo, montano, subalpino, alpino y nival. Además, se estimaron 16 tipos de clase de vegetación de Holdridge (biomas), las zonas identificadas con mayor extensión son bosque húmedo, bosque muy húmedo, desierto, páramo húmedo y matorral. El método es capaz de mapear las principales zonas de vida. La tendencia de las zonas de vida a desplazarse hacia las condiciones climáticas de las latitudes más bajas indica que las normales climatológicas cambiaron. Esto podría estar relacionado al efecto del cambio climático. Con una mejor comprensión de las zonas de vida de Holdridge se puede contribuir a los planes de sostenibilidad de la gestión del territorio.

Palabras claves: Holdridge, climatologías, zonas de vida.

¹ Analista en estudios e investigaciones hidrológicas esabino@senamhi.gob.pe

² Sub Director de Estudios e Investigaciones Hidrológicas wlavado@senamhi.gob.pe

1. INTRODUCCIÓN

Entender el clima a gran escala y sus características locales es bastante complejo en el Perú, principalmente por la interrupción de los patrones de circulación a gran escala, causados por la cordillera de los Andes, por condiciones oceánicas contrastadas y la distribución de masas terrestres (Garreaud et al., 2009; Tatli and Dalfes, 2016a). La vegetación y el clima están estrechamente relacionados entre sí (Woodward et al., 2004). El clima es la principal limitación para el crecimiento de la vegetación (Matthews and Matthews, 1983; Woodward and Williams, 1987). Por otro lado, la distribución de la vegetación determina los patrones físicos de la superficie, como el albedo y el área foliar, que a su vez influyen en el clima (Bartholomé and Belward, 2005).

En 1935, Tansley propuso el término “ecosistema”. Lindeman (1942) apoyó la propuesta de Tansley, a definir al ecosistema como un sistema compuesto de procesos físico-químico-biológicos que operan como parte de una unidad espacio-temporal (Mass and Martínez - Yrizar, 1990). Los biomas se definen como las regiones geográficas principales de organismos vivos discriminantes fisiológicamente bien adaptados a sus patrones de distribución y están fuertemente correlacionados con el clima regional (Chakraborty et al., 2013a). Una Zona de Vida es un grupo de unidades naturales básicas que tienen regiones con crecimiento similar de plantas y animales dentro de un rango definido de condiciones climáticas (Nasir et al., 2015). Originalmente, Holdridge denominó a sus unidades bioclimáticas “formaciones vegetales” o simplemente “formaciones”. Posteriormente, se ha puesto el término de zonas de vida (INRENA, 1995).

En general, existen diversas formas para clasificar la vegetación global, se prefiere principalmente el sistema de clasificación de Holdridge porque utiliza los datos climáticos fácilmente disponibles, lo hace más adecuado referente a otros modelos mecánicos y biogeográficos bien conocidos que demandarían muchos más datos. Algunos factores no son tomados en cuenta, cómo la estacionalidad de las variables climáticas, las propiedades físicas del suelo, interacción humana, etc. (Szelepcsényi et al., 2016). Teniendo en cuenta las ventajas de usar el Modelo de Zonas de Vida de Holdridge (MZVH) para representar biomas de áreas grandes. El MZVH es una especie de clasificación climática y se basa en la teoría de que la vegetación natural de un área que puede ser determinada objetivamente por el clima local. Se trata básicamente de un intento de definir unidades ecológicas comparables llamadas Zonas de Vida (ZV) (Chakraborty et al., 2013a). El MZVH relaciona la distribución a gran escala de la vegetación con tres variables clave del clima; (i) Promedio anual de biotemperatura (BT) en grados centígrados, (ii) media total anual de precipitación (PP) en milímetros, y (iii) relación potencial de evapotranspiración (ETP) (Chakraborty et al., 2013a).

Tenemos una falta de mapas históricos de biomas a nivel nacional, esto crea dificultades cuando se quiere evaluar sus posibles cambios a lo largo del tiempo. El primer Mapa Ecológico del Perú

fue publicado en 1960 y se actualizó en 1976 (segunda versión), a una escala de 1:1 000 000 (INRENA, 1995).

Debemos tener en cuenta que el patrón de cambios espaciales y temporales en los biomas y ecorregiones es controlado principalmente por el clima y su dinámica (Huntley and Webb Lii, 1989). Por ese motivo es necesario anticipar los efectos del calentamiento global que es de gran preocupación y centrar la atención de muchos ecologistas. Los bosques pueden responder dramática y rápidamente al calentamiento global, con cambios significativos y fácilmente observables en bosques de latitudes medias que ocurren hacia el cambio del siglo o poco después (Botkin and Nisbet, 1992).

Este estudio tiene como objetivo aplicar la clasificación del sistema de Holdridge en el Perú, un periodo diferente a la segunda versión del Mapa Ecológico del Perú, el cual corresponde a 1981 hasta el 2010. De la misma manera se generarán nuevas bases de datos en cuanto a las climatologías (precipitación y biotemperatura).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende toda la región del Perú, con una superficie de 1 285 220 km². Es un país que se caracteriza por sus diversos factores fisiográficos y climáticos. La cordillera de los Andes divide el Perú en tres vertientes hidrográficas: Pacífico (VP), Atlántico (VA) y del Lago Titicaca (VT).

La precipitación (PP) en el Perú está influenciada por la variabilidad de los patrones de circulación de gran escala causada por la cordillera de los Andes, las diferentes condiciones de los océanos que los rodea y la distribución del relieve terrestre (Garreaud et al., 2009). Las bajas intensidades de la PP al sur de la VP se explican por la fuerte subsidencia de gran escala sobre el sur este tropical del Océano Pacífico y las condiciones de extrema aridez se deben a condiciones de factores regionales; las PP anuales sobre el Perú se incrementan hacia el norte en concordancia con el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical. Por el contrario, la VA presenta condiciones bastante húmedas hacia el este de los Andes, debido a la convección de humedad y al aire caliente que se transforma en evapotranspiración de los bosques amazónicos y en advección de aire húmedo del Atlántico Tropical. En esta región coinciden fuertes y bajas intensidades de lluvias (entre 6000 y 250 mm/año) que son observados entre estaciones cercanas debido a la ubicación del sotavento y barlovento de las estaciones meteorológicas. Además, la PP anual tiende a disminuir con la altitud siendo menos de 1500 mm sobre los 2000 m.s.n.m. (Espinoza et al., 2009). En la VT las lluvias se presentan sobre todo en el verano austral y son caracterizados por una intensa actividad convectiva combinada con la advección producida por el transporte de humedad del Amazonas (Lavado Casimiro et al., 2012).

Con respecto a la temperatura en el Perú, se encuentra fuertemente relacionada con la elevación¹ (Vicente-Serrano et al., 2018), la temperatura mínima presenta los gradientes más pronunciados y fluctuantes sobre todo durante la noche de invierno (con cielo despejado). Recientes investigaciones, indican que dentro del periodo 1964-2014 la temperatura máxima, media, y mínima aumentaron considerablemente sus valores promedios a razón de 0.18, 0.17 y 0.16 °C/década respectivamente, siendo este aumento sistemático proporcional al aumento de la elevación llegando a presentarse valores de hasta 0.27 °C/década cuando la temperatura máxima por encima de los 4500 m.s.n.m. fue analizada (Vicente-Serrano et al., 2018).

2.2 Datos

2.2.1 Datos climáticos

2.2.1.1 Precipitación

Se entiende por precipitación a la “humedad condensada que cae por la atmósfera sobre la superficie de la tierra bajo diferentes formas, como llovizna, chubasco, nieve, granizo, niebla, rocío, etc.” Para este estudio las precipitaciones captadas por las estaciones meteorológicas no incluyen en sus mediciones el agua que se condensa directamente en la vegetación bajo forma de rocío o que provienen de neblina y luego gotean al suelo, en lugares donde la precipitación era significativa en las formas antes mencionadas. Para los cálculos se tendrá en cuenta el promedio de precipitación total por un año de estación. La resolución espacial elegida para este estudio (1 km) se debe a la disponibilidad de datos de precipitación precisos y confiables. Los datos diarios de las estaciones meteorológicas se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Para la revisión de los datos han sido propuestos distintos criterios, para la identificación de errores de los datos de pluviómetros. Feng et al. (2004) Compara cada estación con las 5 estaciones más cercanas mediante regresiones lineales; Griffiths et al., (2003) identifica el número de valores atípicos en el registro de cada pluviómetro y manualmente evaluó si los valores encontrados tienen relación. Se utilizaron 527 estaciones para el control de calidad (Figura 1).

2.2.1.2 Temperatura

La información de temperatura máxima (TX) y temperatura mínima (TN) utilizada constó de datos diarios de 681 estaciones meteorológicas del SENAMHI. La longitud de las series de temperatura varía desde 1 a 30 años aproximadamente dentro del periodo de 1981-2010.

El proceso de control de calidad se dividió en dos partes: automático y visual. El control automático se basó en los procedimientos de Aguilar et al., (2003) y Vicente-Serrano et al., (2018) y consistió en la evaluación general, rangos fijos, consistencia entre variables, coherencia temporal y coherencia espacial. Los valores que superaron los límites establecidos fueron eliminados. Debido a que un solo proceso de control de calidad no es

apta para series climáticas en la región de estudio (Hunziker et al., 2018), a través del control de calidad visual se identifican las rupturas y/o quiebres evidentes en las series de tiempo y se eliminaron segmentos no homogéneos. Sólo 271 estaciones meteorológicas fueron seleccionadas (Figura 1).

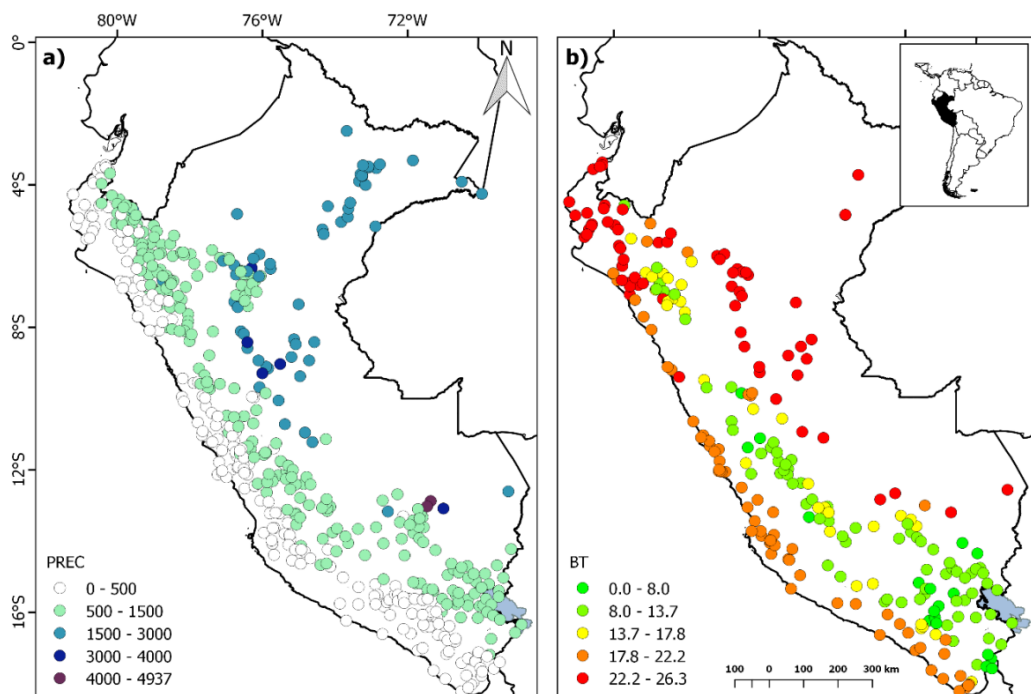


Figura 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para la predicción espacial de la precipitación y la biotemperatura

2.2.1.3 Biotemperatura

La biotemperatura (BT) es estimada basada en datos de temperaturas máximas y mínimas diarios. Estos valores son promediados para cada mes y luego convertidos a sus promedios climáticos mensuales mediante la siguiente ecuación:

$$BT_{(x,y)} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_i > 0(x,y) \quad (1)$$

Donde “i” indica el mes, los promedios climáticos fueron estimados dentro del período de 1981 hasta el 2010.

2.2.2 Ratio de evapotranspiración

La humedad ambiental o ratio de evapotranspiración de cualquier lugar está determinada por la interrelación de dos factores: biotemperatura y precipitación y, por consiguiente, si la cantidad de agua almacenada en el suelo es lo suficientemente adecuada, la tasa de evapotranspiración será cada vez mayor cuanto más alta sea la biotemperatura.

A diferencia de los otros parámetros, biotemperatura y precipitación, la humedad ambiental es imposible de ser medida directamente. Holdridge ha demostrado que es posible hacerlo para

una asociación climática mediante los valores de la relación de evapotranspiración potencial que se obtiene dividiendo la "evapotranspiración potencial total por año" entre la precipitación promedio anual. Esto es debido a que ambos factores son susceptibles de ser medidos o estimados con bastante aproximación.

$$PER(x, y) = \frac{58.93BT(x, y)}{P(x, y)} \quad (2)$$

Donde PER representa la relación de la evapotranspiración potencial media anual y P representa la precipitación.

La Evapotranspiración Potencial (ETP) viene a ser la cantidad de agua que sería evaporada directamente del suelo y otras superficies y la transpirada por la vegetación natural madura en un estado estable o clímax que se encuentra sobre un suelo de buenas características y con un contenido óptimo de humedad.

2.3 DEM

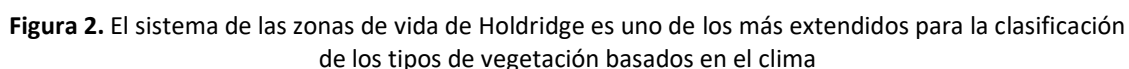
Para corregir el conjunto de datos de temperatura, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), para el área de estudio se extrajo los datos de elevación capturados por "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) de 90 m de resolución. Actualmente, USGS distribuye estos datos de forma gratuita y está disponible para su descarga desde el ftp de la USGS (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/>).

2.4 Diseño experimental

2.4.1 Zonas de vida de Holdridge

En el enfoque de las zonas de vida de Holdridge (Figura 2), hay dos supuestos: (1) las variables de temperatura y precipitación son factores principales que determinan las zonas de vida (biomas) y (2) se supone que la vegetación es independiente de los animales. Según los supuestos, las principales influencias en las zonas de vida son aquellos factores que conforman el clima del sistema de Holdridge.

El sistema de Holdridge es un sistema estrictamente ecológico y de alcance mundial. La clasificación que comprende el sistema se distingue porque define en forma cuantitativa la relación que existe en el orden natural, entre los factores principales del clima y la vegetación. Las zonas de vida son principalmente las divisiones climáticas que definen las condiciones para el funcionamiento del ecosistema. La biotemperatura, la precipitación y la humedad ambiental, que conforman los factores climáticos fundamentales, son considerados como "independientes", mientras que los factores bióticos son considerados esencialmente "dependientes", es decir, subordinados a la acción directa del clima en cualquier parte del mundo.



Las zonas de vida serán definidas en base a información climática, por tal motivo se seleccionaron métodos robustos para la predicción espacial tanto para la PP como para la BT multianual (1981-2010). Para homogenizar la distribución espacial de las estaciones (debido a que el actual no es el ideal a nivel nacional) se utilizaron covariables. Para la predicción espacial de la precipitación se utilizó el producto climatológico basado en el radar 2A25 (TRMM2A25) y para la biotemperatura se realizó un análisis de componentes principales (ACP), mediante la siguiente ecuación:

Donde ψ es la función de transformación de componentes principales y p es el número de variables de entrada del análisis de componentes principales. LAT es latitud, LON es la longitud, ELE es la elevación, DSEA es la distancia al mar, TRMM es el producto climatológico de precipitación basado en el radar 2A25 (TRMM2A25), INSOL es la insolación total, LST son los datos de temperatura superficial del MODIS TERRA (MOD11A1). El ACP es utilizado con el fin de reducir el ruido y redundancia debido a la componente no correlacionada, se sitúa típicamente en componentes de orden superior. La BT presenta un comportamiento más homogéneo en el espacio, sus predictores presentaron valores de correspondencia de hasta 0.97 (MOD11).

Tabla 1: Covariables utilizadas para la predicción espacial asociado a su fuente y/o algoritmo para su generación

Covariable	Fuente
Elevación	SRTM v4.1 (Reuter et al., 2007)
NDVI	MOD13A2 (Huete et al., 2002)
Distancia al mar	Mapa político de Suramérica – gdal_proximity.py
Insolación Total	SRTM v4.1-SAGA GIS Modulo “Potential incoming Solar Radiation”
Temperatura superficial	MOD11A1
PP	TRMM2A25 (Manz et al., 2016)
Latitud	SRTM v4.1
Longitud	SRTM v4.1

2.4.3 Predicción espacial

La predicción espacial tanto para la precipitación como para la biotemperatura fue realizada mediante “Lineal Regression Ordinary Kriging” (LROK), este algoritmo asume que la estacionariedad espacial de los datos no se cumple inicialmente. Es por tal motivo que se utiliza un modelo de regresión lineal utilizando mínimos cuadrados, tanto para la PP y la BT. Los residuales que se generan de este modelo pueden ser entendidos como la parte que no se explica por el modelo de orden estacionario. Estos residuales son interpolados mediante “Ordinary Kriging” (OK). Los resultados aplicando OK son la inclusión de pesos negativos que puede repercutir en la generación de celdas con valores negativos de PP, para esta variable los pesos son corregidos de acuerdo a Deutsch, 1996.

Los residuales son añadidos a la estimación del modelo de regresión inicial obteniéndose los mapas finales de PP y BT a 1 km de resolución (Figura 3). Los semivariogramas de los residuales pueden apreciarse en la Figura 4.

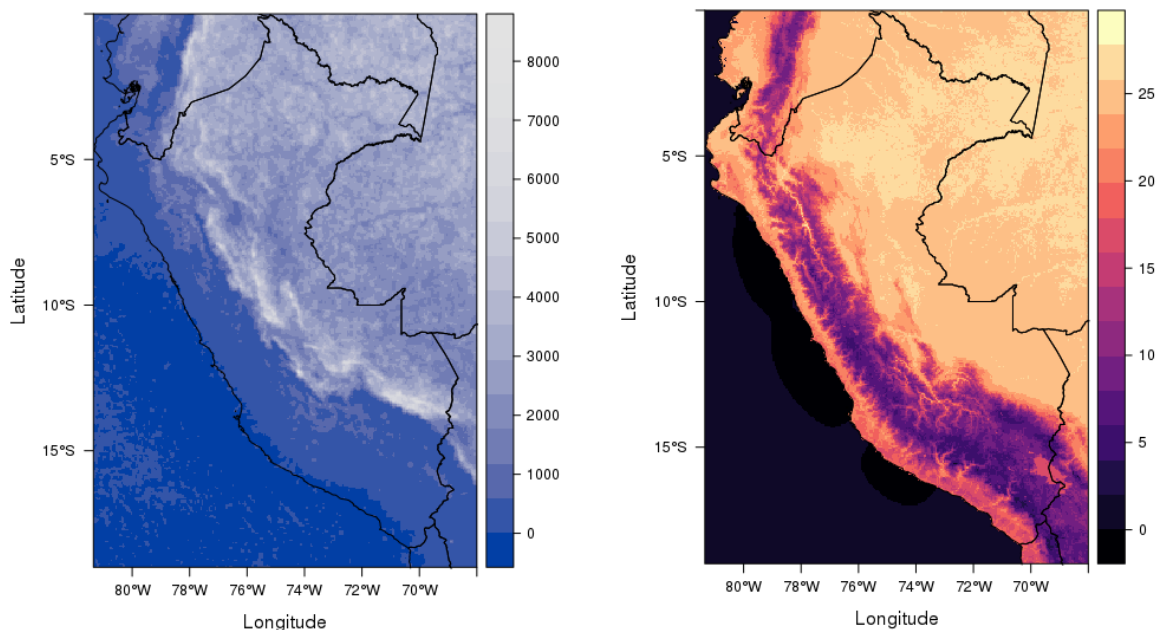


Figura 3. Resultados finales de precipitación y biotemperatura multianual a 1 km de resolución

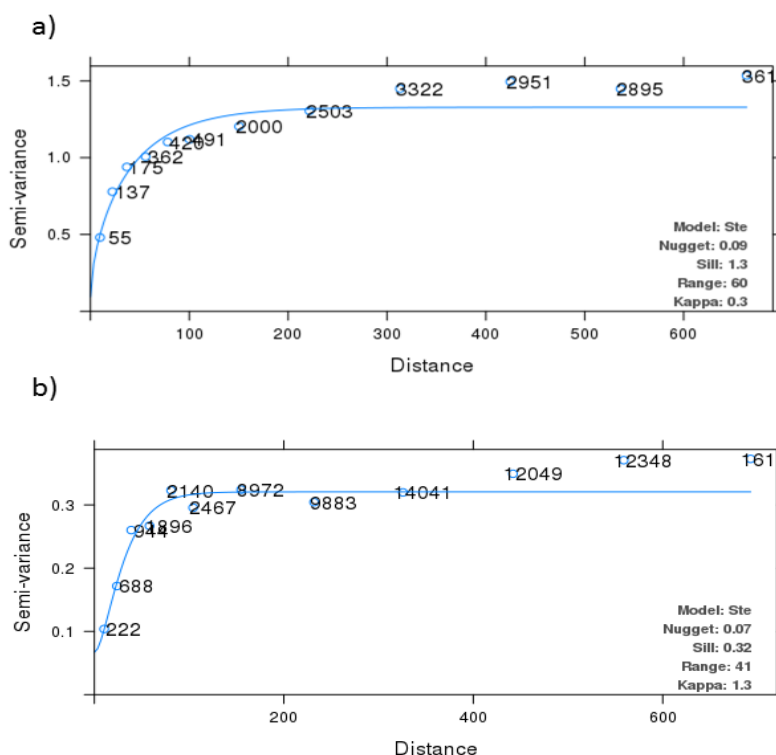


Figura 4. a) Variograma de los residuales de la precipitación multianual; b) Variograma de los residuales de la biotemperatura

2.4.4 Metodología

La metodología para la generación de los mapas de zonas de vida considerando los procesos anteriores se puede apreciar en la Figura 3. Si bien la asignación de una zona de vida a una celda

x_{ij} (donde x_{ij} es definido por el triplete $x_{ij} = \{BT_{ij}, PP_{ij}, ETP_{ij}\}$, tiene una solución, la gran cantidad de geometrías y nodos (Figura 1) hace que el uso de técnicas de clasificación sea un opción viable, y esto se ve plasmado en numerosas investigaciones previas (Chakraborty et al., 2013b; Nasir et al., 2015; Tatli and Dalfes, 2016b).

Al igual que Tatli y Dalfe (2016), el algoritmo de clasificación espectral Ng-Jordan-Weiss (Ng et al., 2002; Planck et al., 2006) es propuesto para la clasificación de las zonas de vida debido a que este tipo de métodos tienen la característica de tomar en cuenta el mayor grado la conectividad en lugar de la compacidad, hace su uso ideal para la identificación de las formas hexagonales de las zonas de vida.

La matriz de semejanza $D_{p \times p}$ es calculada por la siguiente ecuación:

$$D_{ij} = \exp\left(\frac{-[x_i - x_j]^2}{2\sigma^2}\right) \text{ para } i \neq j, \text{ and } D_{ij} = 0 \quad (4)$$

Donde el parámetro de escala σ controla la interacción entre los puntos, seguidamente, una matriz de grado H es definida como:

$$H_{ij} = \sum_j D_{ij} \quad (5)$$

Donde H representa el número de conexiones con otros nodos, ambas matrices son utilizadas para calcular la matriz laplaciana definida de la siguiente forma:

$$L = H^{-1/2} D H^{-1/2} \quad (6)$$

Aplicando "singular value decomposition" (SVD) se encuentran los primeros k autovectores de L ($u_1, u_2, \dots, u_k$; donde $k < p$) dando lugar a la matriz $U_{p \times k} = [u_1 u_2 \dots u_k]$ en donde cada elemento es normalizado formando la matriz M:

$$M_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sqrt{\sum_j u_{ij}^2}} \quad (7)$$

Finalmente, los "cluster" pueden encontrarse aplicando una técnica básica de agrupamiento, tal como "K-means" (MacQueen, 1967) a la matriz M. Se aplica el coeficiente de correlación de Sampson (CS). El CS permite estimar la relación entre dos vectores X e Y y está definido por:

$$CS = \sqrt{\frac{M(C_{YX} C_{XX}^{-1} C_{XY})}{M(C_{YY})}} \quad (8)$$

Donde C representan las covarianzas de las matrices. Finalmente la matriz de similaridad puede ser modificada y reescrita de la siguiente forma:

$$D_{ij} = RS_{ij} \text{ para } i \neq j, \text{ and } D_{ij} = 0 \quad (9)$$

Donde RS_{ij} es calculado entre $x_i = \{BT_i, PP_i, ETP_i\}$ y $x_j = \{BT_j, PP_j, ETP_j\}$.

La clasificación espectral como puede notarse no es un algoritmo netamente iterativo y el costo computacional es menor con una adecuada librería de álgebra lineal. No obstante, el algoritmo descompone la dimensionalidad del sistema inicial para encontrar la solución óptima por lo que los resultados pueden diferir de la solución real si los parámetros no son determinados de forma adecuada.

Las regiones altitudinales propuestas en el AZVP, son calculados a partir de la BT. Para obtener una mayor resolución espacial (90 m), se desarrolló un modelo de regresión con la elevación. Con respecto a las regiones latitudinales se tomó en cuenta los rangos definidos por Holdridge (Figura 2). Finalmente, las provincias de humedad son calculadas a partir de la Tabla 1.

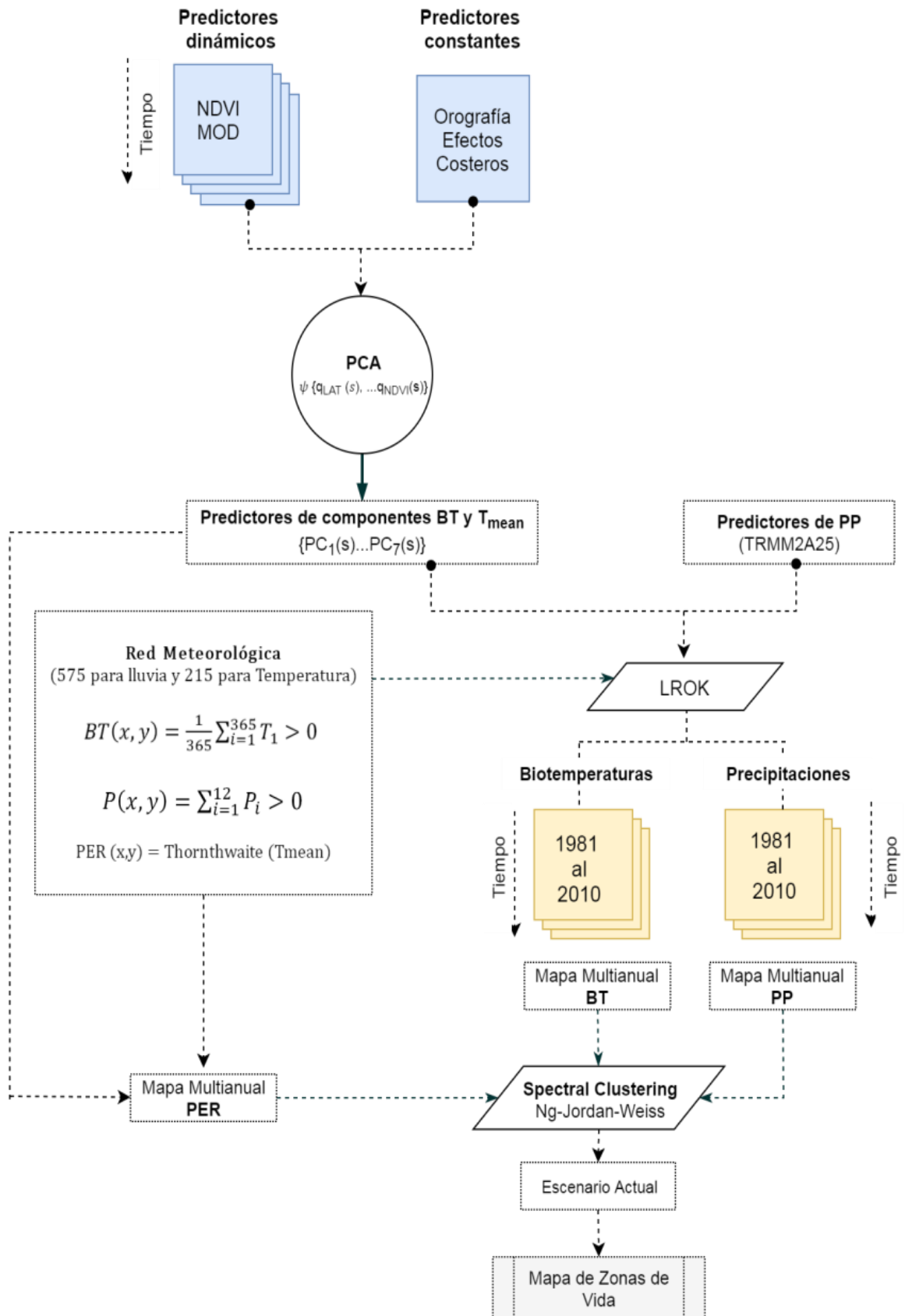


Figura 5. Diagrama para la generación de las zonas de vida

2.4.4.1 Mapeo de los Biomás

Los valores centrales de cada hexágono en el modelo de las zonas vida de Holdridge representan zonas de vida estable. En el proceso, primero se transformaron las siguientes variables en su logaritmo natural: BT, P y PER. Esta transformación de los valores proporciona una base teórica para establecer divisiones en igualdad de pesos. Las ecuaciones serían:

$$BT'(x,y) = \ln BT(x,y) \quad (10)$$

$$P'(x,y) = \ln P(x,y) \quad (11)$$

$$PER'(x,y) = \ln PER(x,y) \quad (12)$$

Segundo, los valores de los puntos centrales en cada hexágono de las zonas de vida de Holdridge se convirtieron al valor logarítmico natural y se usaron como valores de entrada para el conjunto de archivos finales. En tercer lugar, se utilizó un clasificador de distancia mínima ya que dio el mejor resultado entre los otros métodos de clasificación. La expresión para calcular la distancia es:

$$d_i(x,y) = \sqrt{(BT'(x,y) - BT'_i)^2 + (P'(x,y) - P'_i)^2 + (PER'(x,y) - PER'_i)^2} \quad (13)$$

Donde, $d_i(x,y)$ representa la distancia de la cuadrícula (x,y) al centro del hexágono, (BT', P', PER') de la i -ésima zona de vida.

Tabla 2: Relación del ratio de evapotranspiración potencial con las provincias de humedad

Ratio de evapotranspiración potencial	Provincias de humedad
0.125 a 0.25	Superhúmedo o pluvial
0.25 a 0.5	Perhúmedo o muy húmedo
0.5 a 1	Húmedo
1 a 2	Subhúmedo o seco
2 a 4	Semiárido
4 a 8	Árido
8 a 16	Perárido
16 a 32	Superárido

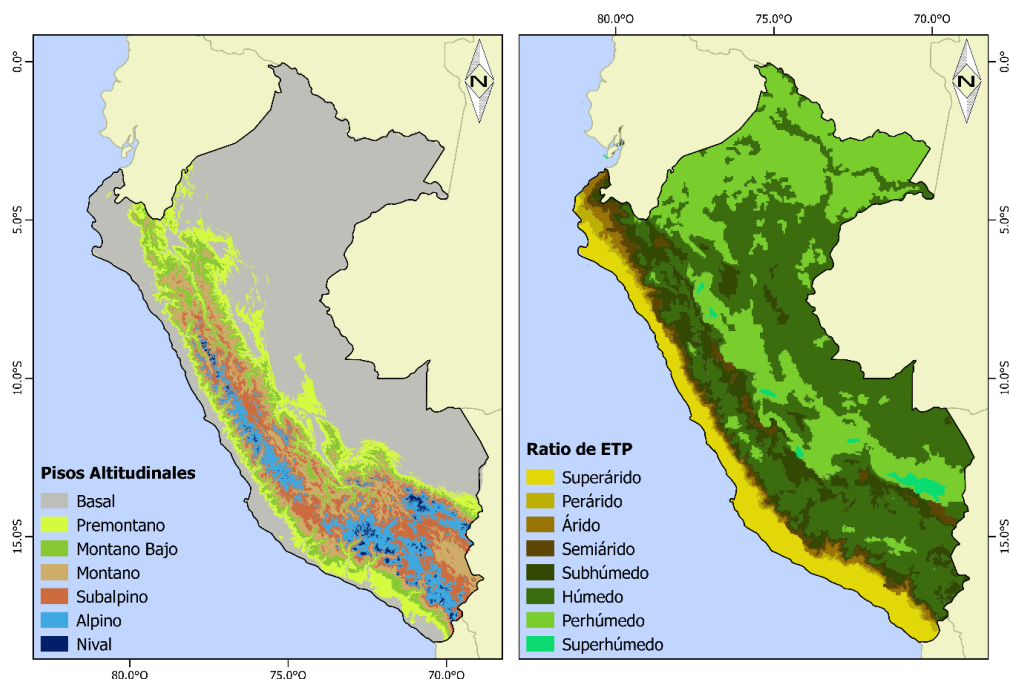


Figura 6. Pisos Altitudinales y provincias de humedad del Perú

3. RESULTADOS

El análisis espacial del mapa de zonas de vida del Perú basado en la clasificación de Holdridge, tiene 66 sub-biomas (resultado de la intersección de las zonas de vida y las regiones altitudinales – Figura 6). Estos sub-biomas pueden ser agrupados en 16 zonas de vida principales (biomas): Bosque húmedo, Bosque muy seco, Bosque pluvial, Bosque seco, Bosque muy húmedo, Desierto, Estepa, Matorral, Monte y estepa espinosa, Monte espinoso, Nival, Paramo húmedo, Paramo muy lluvioso, Tundra húmeda, Tundra muy húmeda y Tundra pluvial (Figura 8). El porcentaje de área de cada zona de vida para todo el Perú por vertientes hidrográficas se muestra en la Figura 7. La zona de vida más representativa en la vertiente del Atlántico es el bosque muy húmedo (40 %), el desierto en la vertiente del Pacífico (48%) y el páramo húmedo en la vertiente del Lago Titicaca (76%). Los sub-biomas con menor presencia en el Perú fueron las Tundras (2.1 %) ubicadas por encima de los 3500 msnm en la sierra sur del país y el Bosque muy seco (0.57%) ubicado en la costa norte.

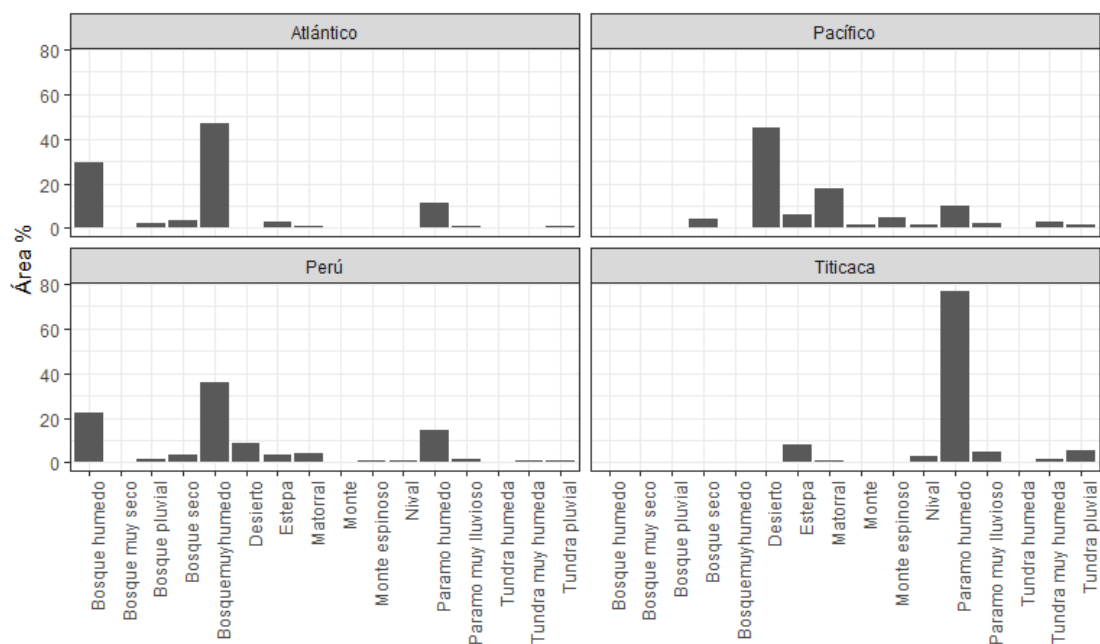


Figura 7. Porcentaje de áreas de las zonas de vida en el Perú y en sus 3 vertientes hidrográficas

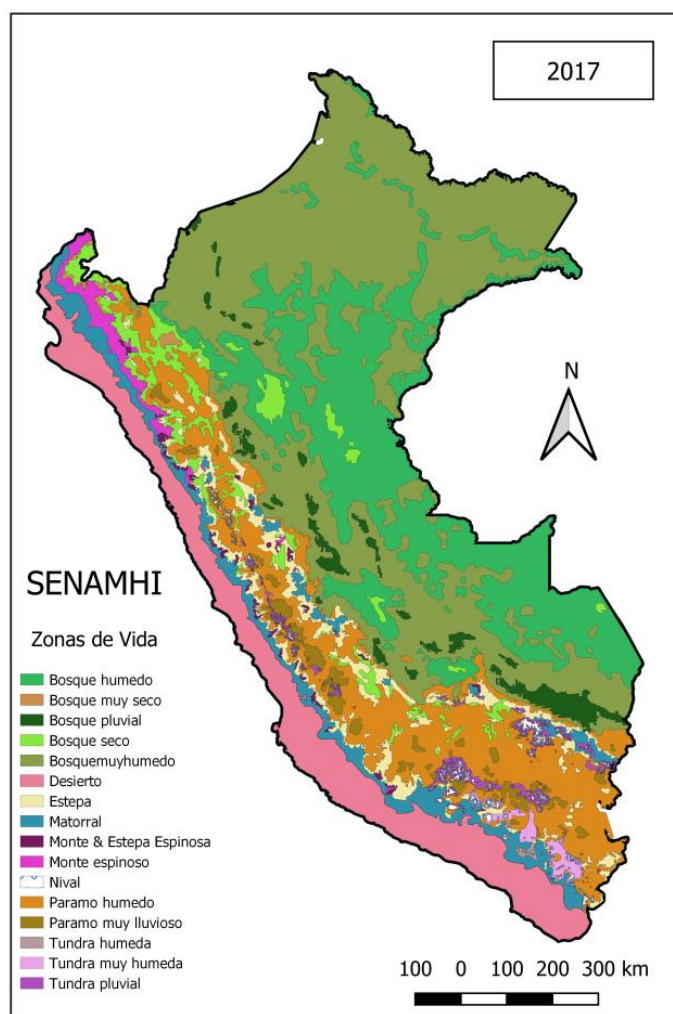


Figura 8. Principales zonas de vida del Perú

4. CONCLUSIONES

Luego de haber finalizado la generación de los mapas del Atlas de ZV del Perú podemos concluir que considerando la climatología de 1980-2010, el Perú presenta una diversidad de biomas elevada (16 biomas y 66 sub-biomas) en comparación a otros países, atribuido a su alta variabilidad climática. Los resultados confirman que el bosque muy húmedo es la ZV con mayor extensión en Perú. Sin embargo, esta solo es predominante dentro de la vertiente del Atlántico.

Es importante mencionar que la definición de pisos altitudinales mediante la BT puede verse sesgada debido al aumento de temperatura global, hecho que no fue contemplado por Holdridge en los años 1970. Por lo que recomendamos investigar si los rangos planteados de BT en la metodología original de Holdridge (1.5, 3, 6 y 12 °C) pueden considerarse representativos al día de hoy.

Si bien es cierto que nuestra densidad de estaciones meteorológicas no es idealmente densa, los predictores utilizados presentaron una correspondencia superior a 0.9 por lo que las estimaciones de BT y PP pueden ser consideradas de buena estimación. Debe considerarse que debido al uso de interpoladores geoestadísticos los valores observados en las estaciones meteorológicas pueden verse alteradas debido al efecto pepita, hecho que es realizado por el interpolador a fin de maximizar la coherencia espacial.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú por facilitar el estudio, con el acceso a los datos y a sus instalaciones computacionales.

6. REFERENCIAS

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C., Wieringa, J., 2003. Guidance on metadata and homogenization. Wmo Td 1186, 53.
- Bartholomé, E., Belward, A.S., 2005. GLC2000: A new approach to global land cover mapping from earth observation data. *Int. J. Remote Sens.* 26, 1959–1977.
<https://doi.org/10.1080/01431160412331291297>
- Botkin, D., Nisbet, R., 1992. Forest response to climatic change: effects of parameter estimation and choice of weather patterns on the reliability of projections *Clim. Chan.* 87–111.
- Chakraborty, A., Joshi, P.K., Ghosh, A., Areendran, G., 2013a. Assessing biome boundary shifts under climate change scenarios in India. *Ecol. Indic.* 34, 536–547.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.013>
- Chakraborty, A., Joshi, P.K., Ghosh, A., Areendran, G., 2013b. Assessing biome boundary shifts under climate change scenarios in India. *Ecol. Indic.* 34, 536–547.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.013>

- Deutsch, C. V., 1996. Correcting for negative weights in ordinary kriging. *Comput. Geosci.* 22, 765–773. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00005-2](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00005-2)
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Jean, G., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil , Peru , Bolivia , Colombia , and Ecuador) 1594, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc>
- Feng, S., Hu, Q., Qian, W., 2004. Quality control of daily meteorological data in China, 1951–2000: A new dataset. *Int. J. Climatol.* 24, 853–870. <https://doi.org/10.1002/joc.1047>
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 281, 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Griffiths, G.M., Salinger, M.J., Leleu, I., 2003. Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific convergence zone. *Int. J. Climatol.* 23, 847–869. <https://doi.org/10.1002/joc.923>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., Ferreira, L., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Am. Hist. Rev.* 19, 195–213. <https://doi.org/10.1093/ahr/119.2.635>
- Huntley, B., Webb Lii, T., 1989. Migration : Species ' Response to Climatic Variations Caused by Changes in the Earth ' s Orbit. *Biogeography*. <https://doi.org/10.2307/2845307>
- Hunziker, S., Brönnimann, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade, M., Ticona, L., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., 2018. Effects of undetected data quality issues on climatological analyses. *Clim. Past* 14, 1–20. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1-2018>
- INRENA, 1995. Mapa Ecológico del Perú. Lima, Perú.
- Lavado Casimiro, W.S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J.C., Guyot, J.L., 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrol. Sci. J.* 57, 625–642. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Manz, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Lavado, W., Willems, B., Robles, L.A., Rodríguez-Sánchez, J.P., 2016. High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the tropical andes. *J. Geophys. Res.* 121, 1190–1207. <https://doi.org/10.1002/2015JD023788>
- Mass, J.M., Martínez - Yrizar, A., 1990. Los ecosistemas: definición, origen e importancia del concepto, *Ecosistemas*. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2013.11.110>
- Matthews, E., Matthews, E., 1983. Global Vegetation and Land Use: New High-Resolution Data Bases for Climate Studies. *J. Clim. Appl. Meteorol.* [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<0474:GVALUN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<0474:GVALUN>2.0.CO;2)
- Nasir, S.M., Afrasiyab, M., Athar, M., 2015. Application of Holdridge Life Zones (HLZ) in Pakistan 47, 359–366.
- Ng, A.Y., Jordan, M.I., Weiss, Y., 2002. On Spectral Clustering: Analysis and an Algorithm. *Adv.*

- Neural Inf. Process. Syst. 14 849–856. <https://doi.org/10.1.1.19.8100>
- Planck, M., Luxburg, U. Von, Luxburg, U. Von, 2006. A Tutorial on Spectral Clustering A Tutorial on Spectral Clustering.
- Reuter, H.I., Nelson, A., Jarvis, A., 2007. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 21, 983–1008. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
- Szelepccsényi, Z., Breuer, H., Kis, A., Pongrácz, R., Sümegi, P., 2016. Assessment of projected climate change in the Carpathian Region using the Holdridge life zone system. *Theor. Appl. Climatol.* 131, 593–610. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1987-3>
- Tatli, H., Dalfes, H.N., 2016a. Defining Holdridge's life zones over Turkey. *Int. J. Climatol.* 36, 3864–3872. <https://doi.org/10.1002/joc.4600>
- Tatli, H., Dalfes, H.N., 2016b. Defining Holdridge's life zones over Turkey. *Int. J. Climatol.* 36, 3864–3872. <https://doi.org/10.1002/joc.4600>
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Correa, K., Avalos, G., Bazo, J., Azorin-Molina, C., Domínguez-Castro, F., Kenawy, A. El, Gimeno, L., Nieto, R., 2018. Recent changes in monthly surface air temperature over Peru, 1964–2014. *Int. J. Climatol.* 38, 283–306. <https://doi.org/10.1002/joc.5176>
- Woodward, F.I., Lomas, M.R., Kelly, C.K., 2004. Global climate and the distribution of plant biomes. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 359, 1465–1476. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1525>
- Woodward, F.I., Williams, B.G., 1987. Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio* 69, 189–197. <https://doi.org/10.1007/BF00038700>