

POR UNA BIOGEOGRAFÍA
PLURAL: PERSPECTIVAS
CIENTÍFICAS, CONSERVACIÓN
Y CAMBIO CLIMÁTICO

revista



ISSN 2179-0892

Volume 28 • n° 3 (2024)

e230590

Adaptación del método
de Tipos de Regímenes
Bioclimáticos (TRB) a la isla
de El Hierro (Canarias)

Damián Caballero Fernández¹ 

¹Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain
E-mail: damian.caballero@ub.edu

Montserrat Salvà-Catarineu² 

²Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain
E-mail: salva@ub.edu

Cómo citar este artículo: CABALLERO FERNÁNDEZ, D.; SALVÀ-CATARINEU, M. Adaptación del método de Tipos de Regímenes Bioclimáticos (TRB) a la isla de El Hierro (Canarias). **Geosp**, v. 28, n. 3, e230590. 2024. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2024.230590es>



Este es un artículo publicado en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, sin restricciones siempre que el trabajo original sea debidamente citado.

Adaptación del método de Tipos de Regímenes Bioclimáticos (TRB) a la isla de El Hierro (Canarias)

RESUMEN

Los Tipos de Regímenes Bioclimáticos (TRB) es una metodología de clasificación bioclimática global que integra datos termo-pluviométricos y edáficos. Desde 2022, el paquete BIOCLIM en RStudio permite aplicar esta clasificación a diversas áreas de estudio. Este estudio prueba el método TRB en El Hierro, una isla volcánica con características geográficas complejas y gran biodiversidad, para evaluar su aplicabilidad a escalas grandes. Se utilizó el método Kriging Universal (KU) para la interpolación espacial de los mapas, y para el mapa de subtipos bioclimáticos (sTRB), se aplicó también un modelo de regresión lineal múltiple ajustado mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y una corrección de residuos con Kriging Ordinario (KO). La evaluación de las interpolaciones muestra buena precisión, aunque con limitaciones en las áreas más elevadas e inaccesibles de la isla. Los resultados ofrecen un mapa bioclimático actualizado, ajustado y detallado, crucial en el contexto de la emergencia climática.

Palabras clave: TRB. BIOCLIM. Clasificaciones bioclimáticas. Kriging Universal. Canarias.

Adaptation of the Types of Bioclimatic Regimes (TBR) method to the island of El Hierro (Canary Islands)

ABSTRACT

Types of Bioclimatic Regimes (TBR) is a global bioclimatic classification methodology that integrates thermo-pluviometric and edaphic data. Since 2022, the BIOCLIM package in RStudio has facilitated the application of this classification across various fields of study. In this study, the TBR method is tested on El Hierro, a volcanic island with complex geographical features and high biodiversity, to evaluate its applicability at large scale. The Universal Kriging (UK) method was employed for the spatial interpolation of maps. Additionally, for the bioclimatic subtypes map (TBRs), a multiple linear regression model adjusted using Ordinary Least Squares (OLS) and a residual correction using Ordinary Kriging (OK) were applied. The evaluation of the interpolations demonstrates good precision, although with limitations in the higher and more inaccessible areas of the island. The results provide an updated, detailed, and adjusted bioclimatic map, which is crucial in the context of the climate emergency.

Keywords: TBR. BIOCLIM. Bioclimatic classifications. Universal Kriging. Canary Islands.

Adaptação do método de Tipos de Regimes Bioclimáticos (TRB) à ilha de El Hierro (Canárias)

RESUMO

Os Tipos de Regimes Bioclimáticos (TRB) são uma metodologia de classificação bioclimática global que integra dados termo-pluviométricos e edáficos. Desde 2022, o pacote BIOCLIM no RStudio permite aplicar essa classificação a diversas áreas de estudo. Este estudo testa o método TRB em El Hierro, uma ilha vulcânica com características geográficas complexas e grande biodiversidade, para avaliar sua aplicabilidade em escalas grandes. O método Kriging Universal (KU) foi utilizado para a interpolação espacial dos mapas, e para o mapa de subtipos bioclimáticos (sTRB), também foi aplicado um modelo de regressão linear múltipla ajustado por

meio de mínimos quadrados ordinários (MCO) e uma correção de resíduos com Kriging Ordinário (KO). A avaliação das interpolações mostra boa precisão, embora com limitações nas áreas mais elevadas e inacessíveis da ilha. Os resultados oferecem um mapa bioclimático atualizado, ajustado e detalhado, crucial no contexto da emergência climática.

Palavras-chave: TRB. BIOCLIM. Classificações bioclimáticas. Kriging Universal. Canárias.

INTRODUCCIÓN

Las clasificaciones bioclimáticas permiten categorizar, sintetizar y describir los climas de diferentes territorios, así como sus características biológicas (Pham et al., 2023). Estas clasificaciones son fundamentales para la fitoclimatología, disciplina de la biogeografía que estudia las relaciones entre la distribución de la vegetación y el clima. A lo largo de los años, numerosos estudios han intentado proponer clasificaciones fitoclimáticas válidas a escala mundial (Rivas Martínez; Rivas Sáenz; Penas, 2002; Cui et al., 2021; Serrano-Notivoli; Longares; Cámara Artigas, 2022). Dichas clasificaciones se basan en parámetros climáticos propuestos por autores como Thornthwaite (1933, 1948), Köppen y Geiger (1936) y Montero de Burgos y González Rebollar (1974), o por nomenclaturas y límites ecológicos provenientes de investigadores como Drude (1890), Clements (1909) y, en el caso específico de España, de Huguet del Villar (1929).

Una de las clasificaciones bioclimáticas mundiales más célebre es la propuesta por Rivas-Martínez (1995) y Rivas-Martínez et al. (2002). Se sustenta en el cálculo de una serie de índices bioclimáticos, como el índice de continentalidad o el de ombrotermicidad, y de magnitudes térmicas, como la temperatura media anual. El objetivo de estos cálculos es categorizar el planeta basándose en la interacción entre la temperatura y la precipitación. Rivas-Martínez et al. (2002) logran identificar cinco grandes macrobiosistemas (tropical, mediterráneo, templado, boreal y polar), así como 27 bioclimas más detallados, que a su vez pueden dividirse en termotipos (según la temperatura) y ombrotipos (según la humedad). La combinación de estos índices permite conocer la distribución y el tipo de vegetación que puede desarrollarse en cada lugar de la Tierra.

Este sistema es ampliamente utilizado y ha sido frecuentemente adaptado a nivel nacional (Mesquita; Sousa, 2009; Pesaresi et al., 2014) o regional (Pham et al., 2023; Massarelli; Campanale, 2023). Se trata también del método más empleado en el archipiélago canario, destaca la categorización bioclimática a todas las islas por parte de Del Arco Aguilar et al. (2006) y Del Arco Aguilar y Rodríguez Delgado (2018). Del Arco Aguilar, Acebes y Pérez de Paz (1996) y Del Arco Aguilar et al. (1999, 2002, 2006, 2009), también ha adaptado este sistema mundial de clasificación a islas específicas, como es el caso de La Gomera, Tenerife, Gran Canaria e incluso a El Hierro.

El método de Tipos de Regímenes Bioclimáticos (TRB), propuesto por Cámara Artigas, Díaz del Olmo y Martínez Batlle (2020), busca ofrecer una clasificación global, rigurosa y multiescalar. Su principal innovación radica en la combinación de variables termopluiométricas y edáficas del territorio, lo que permite una mejora significativa en la clasificación bioclimática. El TRB se fundamenta en el cálculo de tres componentes clave: el balance de agua, que determina la capacidad del ambiente para sustentar la vegetación; el balance bioclimático, que identifica períodos de crecimiento activo de las plantas y

períodos de inactividad; y las intensidades bioclimáticas, que proporcionan información sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los cálculos de estos balances se basan en clasificaciones clásicas, como las de Montero de Burgos y González Rebollar (1974) y las propuestas por Thornthwaite (1933, 1948).

El objetivo de este trabajo es adaptar las clasificaciones del TRB a las características geoespaciales de El Hierro, utilizando registros obtenidos de 17 estaciones térmicas y 26 estaciones pluviométricas distribuidas por la isla para probar el modelo a escala de detalle.

MÉTODO

Área de estudio

El Hierro (268 km²) es la isla más joven y occidental del archipiélago canario, ubicada entre las coordenadas 27°38'-27°50'N y 17°53'-18°09'W (Figura 1). La isla se distingue por su diversidad paisajística, geográfica y bioclimática (Carracedo et al., 1997) y alberga la mayor extensión de *Juniperus canariensis* de todas las Islas Canarias (Salvà Catarineu et al., 2016).

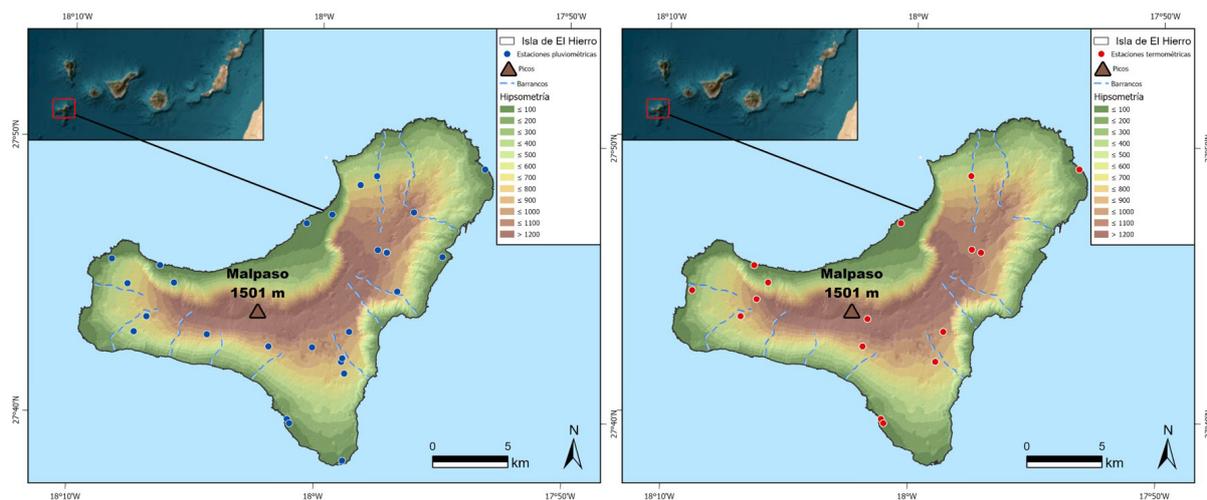


Figura 1 – Localización de El Hierro y estaciones termo-pluviométricas empleadas. **Fuente:** Elaboración propia con datos del GRAFCAN y la AEMET.

Su clima está influenciado por factores termodinámicos asociados a las latitudes medias, como la corriente en chorro y el Anticiclón de las Azores (Dorta Antequera, 2007; Del Arco Aguilar; Rodríguez Delgado, 2018). Además, los factores geográficos locales configuran los tipos de clima en el archipiélago. La orientación y altitud de El Hierro varían considerablemente, lo que provoca una amplia gama de climas, desde desértico, estepario y mediterráneo hasta climas de tipo oceánico (Mayer Suárez; Luque Söllheim; García Hernández, 2022; Luque Söllheim; Mayer Suarez; García Hernández, 2024).

El régimen climático está marcado por la estabilidad atmosférica, dominado por los alisios y una pronunciada inversión térmica, que es responsable de la formación de nubosidad baja y estratiforme en la vertiente norte de la isla. Durante el final del otoño, invierno y principios de primavera, el Anticiclón de las Azores se desplaza hacia el sur y el oeste, lo que permite la llegada ocasional de frentes y bajas presiones al territorio (Morales Matos; Pérez González, 2000).

Estas condiciones climáticas se reflejan en la vegetación, que varía según la altitud y la orientación de la isla. En la costa predominan las comunidades de suculentas como el tabaibal-cardonal. A unos 200-700 metros se encuentra el bosque termófilo, piso en el que encontramos el paradigmático sabinar canario. A su vez, el monte verde comienza alrededor de los 600 metros en las áreas orientadas hacia norte, y el pino canario aparece a partir de los 700 metros en la vertiente sur de la isla (Aeschmann, 2021).

En lo relativo a sus características edáficas, los suelos de la isla son generalmente poco profundos, formados sobre materiales recientes. Presentan una alta tasa de infiltración y una baja capacidad de retención de agua (Padrón Padrón et al., 1990; Padrón Padrón, 1993).

Datos empleados y capas cartográficas

Para el presente estudio se utilizaron 26 estaciones pluviométricas y 17 estaciones termométricas (Figura 2), cuyos registros fueron proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La selección de estas estaciones se realizó con el objetivo de garantizar una distribución geográfica equilibrada en la isla, asegurando además la calidad de los registros durante el período de estudio.

Los valores de la capacidad de campo de cada estación, necesarios para los cálculos bioclimáticos, fueron determinados a partir del estudio de Padrón Padrón et al. (1990), que evalúa los suelos de la isla.

Además, para mejorar la precisión de las interpolaciones espaciales en un territorio con fuertes variaciones geoespaciales, se incorporaron como capas topográficas un Modelo Digital del Terreno (MDT) y un mapa de orientaciones suavizado, ambos proporcionados por Cartografía de Canarias S.A. (GRAFCAN) con una resolución original de 25x25 metros, posteriormente ajustados a una resolución de 100x100 metros.

Todos los mapas climáticos y bioclimáticos fueron generados utilizando el software ArcGIS Pro (versión 2.5.0).

Procesamiento y análisis de datos climáticos y bioclimáticos

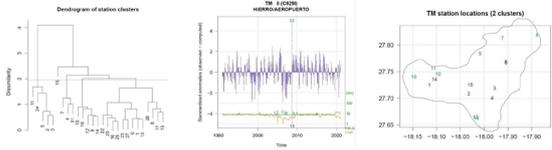
El procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo en varios procesos. En primer lugar, debido a la poca calidad de los registros termo-pluviométricos de la isla, fue necesario reconstruir los datos climáticos de la última normal climática (1991-2020) mediante la selección de estaciones con buena correlación entre sí, maximizando así la cantidad de datos completos. De este modo, se utilizó el software CLIMATOL (versión 4.1.1). También se usó CLIMATOL para verificar la calidad y homogeneidad de los registros y para rellenar lagunas de datos puntuales (Guijarro, 2024).

Con posterioridad, se realizó la clasificación bioclimática de las estaciones meteorológicas utilizando el paquete BIOCLIM en Rstudio (Serrano-Notivolí; Longares; Cámara Artigas, 2022) en función de las variables de temperatura media, precipitación media y capacidad de campo, utilizando el método TRB (Cámara Artigas; Díaz del Olmo; Martínez Batlle, 2020). A continuación, se ejemplifican los parámetros incorporados necesarios para poder calcular los subtipos bioclimáticos en cada estación. En primer lugar, se incorporó la temperatura media mensual, después la precipitación media mensual, la latitud y por último la capacidad de campo del observatorio:

ADAPTACIÓN DEL MÉTODO TRB A LA ISLA DE EL HIERRO (CANARIAS)

Fase 1

Recopilación de datos termo-pluviométricos. Se emplearon 26 estaciones pluviométricas y 17 estaciones termométricas.



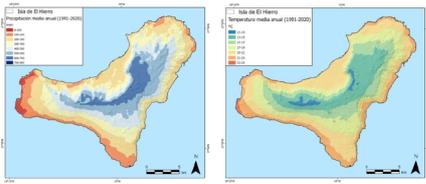
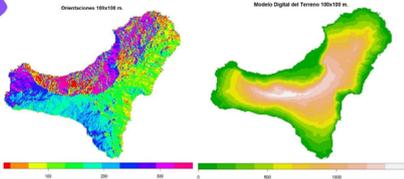
Control de calidad, homogenización y reconstrucción de registros climáticos con CLIMATOL (Gujarro, 2024)



Cálculo de la temperatura media mensual y de la precipitación media mensual para el período de referencia 1991-2020 utilizando el paquete DPLYR (Wickham et al., 2023).

Fase 2

Empleo del Modelo Digital del Terreno (MDT) y de la capa de orientaciones suavizada a una resolución de 100x100 metros, generados a partir de un MDT de 25x25 metros proporcionado por GRAFCAN (2024).



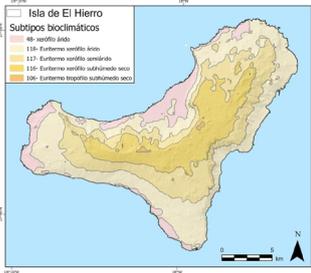
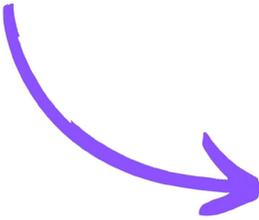
Generación de mapas de temperatura promedio y precipitación promedio anual (1991-2020) mediante interpolación espacial utilizando Kriging Universal (KU) con el paquete GSTAT (Pebesma y Graeler, 2024), empleando dos covariables: el Modelo Digital del Terreno (MDT) y la capa de orientaciones.



Obtención de la capacidad de campo de cada observatorio basándonos en el estudio de Padrón- Padrón et al., (1990), que evalúa los suelos de la isla.

Fase 3

Aplicación del método TBR (Tipos de Regímenes Bioclimáticos) utilizando el paquete BIOCLIM. El mapa final fue generado mediante el método de Kriging Universal (KU). Los valores de los subtipos utilizados en la interpolación fueron mejorados a través de un modelo de regresión lineal múltiple ajustado con el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) al que se le aplicó un modelo de Kriging Ordinario para corregir los residuos (KO).



Evaluación de la precisión de la modelización realizada para la precipitación media, la temperatura media y los subtipos bioclimáticos, mediante una validación cruzada dejando uno fuera.

Interpolación espacial- kriging universal Precipitación media			
EM	RECM	RECM(%)	R ²
-3,05	58,61	19,18	0,85

Interpolación espacial- kriging universal Temperatura media			
EM	RECM	RECM(%)	R ²
-0,15	0,86	4,50	0,89

Interpolación espacial- kriging universal Subtipos bioclimáticos			
EM	RECM	RECM(%)	R ²
0,01	0,11	4,11	0,98

Figura 2 – Resumen esquemático del método empleado. **Fuente:** Elaboración propia.

CABALLERO FERNÁNDEZ, D.; SALVÀ-CATARINEU, M.

Estación: El Hierro-aeropuerto

wb < - watbal(t = c(19.03,18.80, 19.13, 19.66, 20.69, 22.06, 23.12, 24.12, 24.42, 23.70, 21.84, 20.21),

p = c(27.47,24.92, 20.20,14.25, 2.57, 1.48, 0.20, 1.17, 3.46, 17.60, 30.74, 41.28),

lat = 27.75,

CC = 150)

Para efectuar las interpolaciones se utilizó RStudio, versión 2023.12.1+402, y el paquete GSTAT (Pebesma; Graeler, 2024). EL KU fue la interpolación espacial seleccionada por considerarse la más adecuada, dadas las fuertes variaciones geoespaciales que se producen en la isla de El Hierro. El KU es una técnica que tiene en cuenta tanto la variabilidad local como las tendencias espaciales relacionadas con el terreno, lo que permite modelar mejor las complejas características de la isla (Chazarra Bernabé, 2014; Santra; Kumar; Panwar, 2017). Además, esta técnica es particularmente conveniente debido al número de estaciones empleadas.

No obstante, aunque el mapa final de sTRB se obtuvo también mediante KU, las predicciones empleadas para esa interpolación se basaron en los valores de los subtipos mejorados a través de una combinación de técnicas. En primer lugar, se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple ajustado con el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), donde los subtipos fueron reconvertidos a variables numéricas como variable dependiente. Posteriormente, se aplicó un modelo de Kriging Ordinario para ajustar los residuos del MCO. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando herramientas de geoprocésamiento como Mínimos Cuadrados Ordinarios y Kriging en ArcGIS Pro.

VALIDACIÓN

Para verificar la calidad de las interpolaciones KU, se utilizó la validación cruzada dejando uno fuera con el paquete GSTAT de Rstudio (Pebesma; Graeler, 2024), más conocida en inglés como *Leave-One-Out Cross-Validation* o LOO CV, un método habitual para conocer la bondad de la modelización (Vehtari; Gelman; Gabry, 2017; Geroldinger et al., 2023).

De este modo, se calculó el error medio (Ecuación 1):

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (1)$$

La raíz del error cuadrático medio, en valores absolutos y en porcentaje (Ecuación 2):

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

Y el coeficiente de determinación (Mokari et al., 2022) (Ecuación 3):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Posteriormente se comprobó la coherencia de los resultados con otros estudios climáticos o bioclimáticos comparables (Luque Söllheim; Mayer Suárez; García Hernández, 2024).

RESULTADOS

Mapas termo-pluviométricos

Se obtuvieron los mapas termo-pluviométricos detallados de El Hierro (Figura 3 y Figura 4). La precipitación media registrada en la isla durante la última normal climática muestra un importante incremento altitudinal. Se observa la mayor precipitación, cercana o superior a los 700 mm, en las áreas más elevadas. Los territorios con valores mayores se se

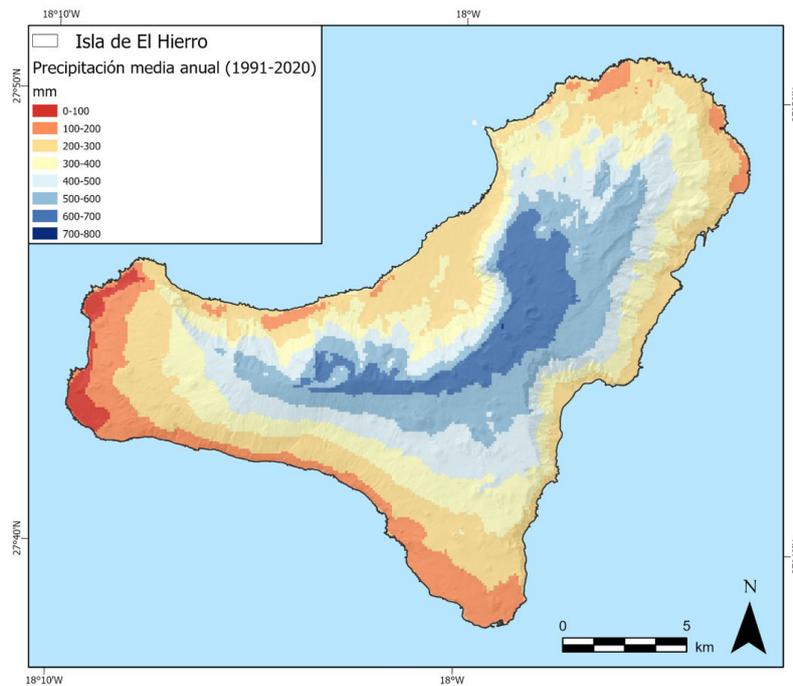


Figura 3 – Precipitación media anual en la isla de El Hierro (1991-2020). **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos AEMET.

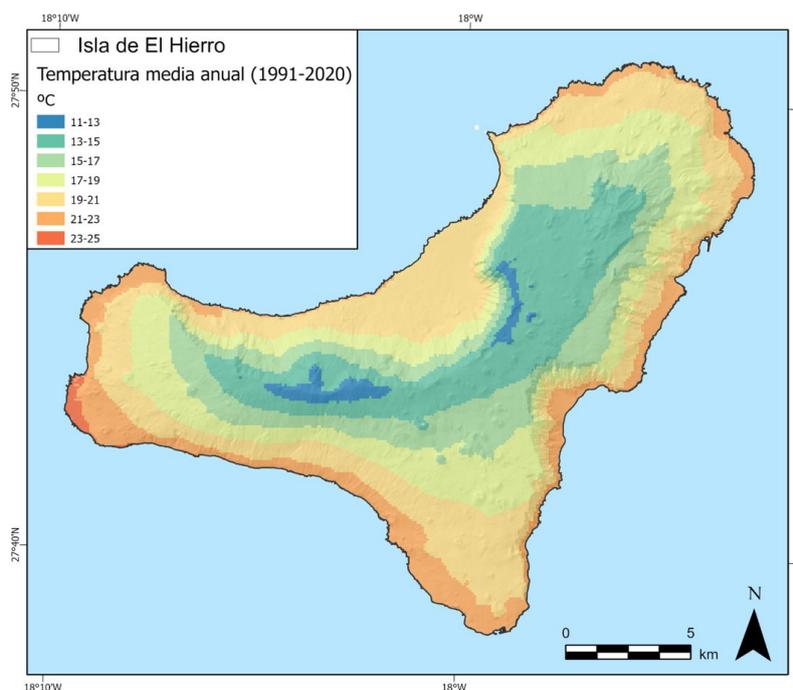


Figura 4 – Temperatura media anual en la isla de El Hierro (1991-2020). **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos AEMET.

localizan en el noreste de la isla, territorio afectado tanto por las precipitaciones orográficas como las de tipo horizontal. En contraste, el área con menores precipitaciones se encuentra en el sur y suroeste, donde los valores acumulados son inferiores a los 100 mm. Esto se explica por ser un territorio a barlovento de los vientos alisios predominantes, en un espacio donde se produce una sombra pluviométrica. Asimismo, su escasa altitud, priva a estas zonas de verse beneficiadas por las precipitaciones generadas por gradiente altitudinal (Mayer Suárez; Marzol Jaén, 2013).

Las temperaturas medias en la isla son muy suaves, debido a su situación subtropical y su latitud (Figura 4). Las temperaturas muestran un descenso por efecto altitudinal, siendo la costa las que registran mayores temperaturas promedios (superiores a los 20 °C) y las áreas más elevadas que presentan promedios propios de Europa continental (11-13 °C). Excepcionalmente, en el sursuroeste del territorio las temperaturas llegan a acercarse o superar los 23 °C, áreas donde la insolación es más elevada y los días con nubosidad son muy reducidos (Marzol Jaén; Máyer Suárez, 2012). Pese a ser una magnitud que podría ser considerada anómala, esta fue validada con los resultados proporcionados por del Atlas Climático de Canarias (Luque Söllheim; Mayer Suárez; García Hernández, 2024).

Mapa de subtipos bioclimáticos

El método TRB adaptado a el Hierro nos ha permitido identificar hasta cinco subtipos bioclimáticos (Figura 5).

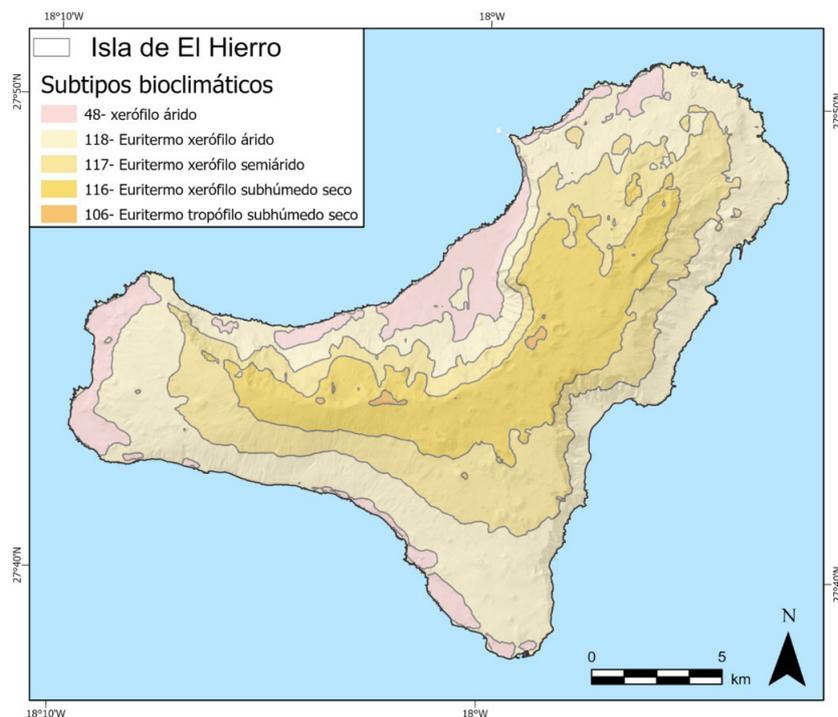


Figura 5 – Clasificación bioclimática presente en la isla de El Hierro. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos AEMET.

Según este método, el régimen termal (tropical) está presente en buena parte de las áreas costeras del territorio, abarcando hasta el 11,55% del total de la isla (Tabla 1) Esto se debe a su comportamiento térmico, con temperaturas medias superiores a los 18°C durante todos los meses del año. En estas áreas predominan los espacios xerófilos áridos, con una paralización vegetativa de 5-8 meses debido a la falta de agua.

Tabla 1 – Extensión en Km² y el correspondiente porcentaje de cada subtipo en El Hierro.

Subtipo	Área en Km ²	Porcentaje %	Vegetación potencial más representativa
48- Xerófilo árido	30,98	11,55	Tabaibal-Cardonal
118- Euritermo xerófilo árido	105,89	39,51	Sabinar herreño
117- Euritermo xerófilo semiárido	75,33	28,10	Sabinar con pinos-Monteverde seco
116- Euritermo xerófilo subhúmedo seco	54,87	20,47	Pinar herreño-Monteverde
106- Euritermo tropófilo subhúmedo seco	1,21	0,45	Fayal-brezal de altitud

Fuente: Elaboración propia.

A medida que nos adentramos hacia el interior y ascendemos en altitud, predominan los subtipos euritermos (subtropicales), con temperaturas medias mensuales entre 7,5-18 °C. No existe paralización térmica, aunque la paralización hídrica vuelve a ser relevante, con períodos que van de 5 a 8 meses. En estas zonas predominan los espacios xerófilos áridos, el subtipo más abundante en la isla (39,51%), semiáridos o subhúmedos secos.

En algunas áreas dispersas de las zonas más elevadas de la isla, con una prevalencia del 0,45%, se observa un subtipo tropófilo, con una paralización hídrica más limitada de 1 a 4 meses. Este subtipo se observa en Canarias a unos 1.400 metros de altitud en islas que alcanzan mayores altitudes, como La Palma. Sin embargo, este subtipo se ha obtenido mediante interpolación y no ha podido ser validado ya que en las áreas más elevadas de la isla faltan estaciones con registros de calidad y cantidad.

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que, a pesar de la reducida extensión de la isla de El Hierro (268 km²), esta presenta una notable variedad bioclimática.

Los mapas climáticos elaborados fueron comparados con los del Atlas Climático de Canarias, ambos trabajos utilizando metodologías similares. La principal diferencia entre ambos radica en que el Atlas emplea como método de interpolación principal el MLR y considera más covariables topográficas, como la latitud, la longitud y la distancia al mar. No obstante, el presente estudio utilizó un mayor número de estaciones provenientes de la isla de El Hierro. La validación mostró una importante equivalencia, tanto en magnitudes como en la distribución termo-pluviométrica, entre los resultados del Atlas y los obtenidos en este trabajo (Luque Söllheim; Máyer Suarez; García Hernández, 2024).

La adaptación del método TRB a la isla nos ha permitido comprobar que El Hierro presenta una mayor cantidad y diversidad de subtipos bioclimáticos que los identificados en estudios previos que han aplicado TRB con una resolución espacial de 1 km (Cámara Artigas; Díaz del Olmo; Martínez Batlle, 2020). Se ha demostrado que a una resolución más grande y aplicando interpolaciones más adecuadas para un espacio, en este caso insular, y variables topográficas que afectan a la distribución de los subtipos, mejora el resultado. Los resultados también son coherentes con investigaciones anteriores que emplean otros métodos para caracterizar biogeográficamente la isla (Del Arco Aguilar; Acebes; Pérez de Paz, 1996; Del Arco Aguilar et al., 1999; Stierstorfer, 2005).

Los resultados obtenidos mediante la interpolación utilizando KU muestran resultados muy precisos (Tabla 2), comparables con rendimientos de interpolación aplicados a áreas insulares (Garzón Machado; Otto; Del Arco Aguilar, 2014).

En el caso de las temperaturas, la validación arroja resultados aún más precisos en todos los cálculos efectuados, debido a que estas no presentan valores tan contrastados como en el caso de la precipitación (Tabla 3).

Tabla 2 – Resultados de la validación cruzada de la interpolación KU para la media de las precipitaciones.

Interpolación espacial- Kriging Universal	
Precipitación media	
Error medio	3,05
Raíz del error cuadrático medio	58,61
Raíz del error cuadrático medio en %	19,18
Coefficiente de determinación (R^2)	0,85

Tabla 3 – Resultados de la validación cruzada de la interpolación KU para la media de las temperaturas.

Interpolación espacial- Kriging Universal	
Temperatura media	
Error medio	-0,15
Raíz del error cuadrático medio	0,86
Raíz del error cuadrático medio en %	4,50
Coefficiente de determinación (R^2)	0,89

En lo que respecta a los subtipos, los resultados de las predicciones de la validación cruzada fueron mejorados (Tabla 4) a través de un proceso de predicción que abarcó tres etapas: primero se aplicó Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), seguido de Kriging Ordinario (KO) para corregir los residuos, y finalmente se obtuvo la interpolación final utilizando Kriging Universal (KU):

Tabla 4 – Resultados de la validación cruzada aplicada a la interpolación KU para los subtipos bioclimáticos.

Interpolación espacial- Kriging Universal	
Subtipos bioclimáticos	
Error medio	-0,01
Raíz del error cuadrático medio	0,11
Raíz del error cuadrático medio en %	4,11
Coefficiente de determinación (R^2)	0,98

Estudios previos realizados en la Península Ibérica y Canarias habían subrayado la conveniencia de utilizar KU para registros climáticos, particularmente en territorios con características complejas, como los espacios insulares (Izquierdo; Márquez, 2006, 2007; Caballero; Giraldo; Mateu, 2013; Cantet, 2017) y el uso de un Modelo de Regresión Lineal, (MRL) + KO para la elaboración de mapas bioclimáticos (Garzón Machado; Otto; Del Arco Aguilar, 2014).

En este trabajo al obtener un mapa detallado de subtipos, nos permite identificar más fácilmente, en el caso de El Hierro, aquellos espacios que se ven afectados por la precipitación horizontal. La cripto-precipitación ocurre cuando el vapor de agua de la niebla se condensa al interactuar con la vegetación, formando gotas de agua que son capturadas por las hojas y ramas. Dicho fenómeno debería ser estudiado con mayor profundidad en investigaciones bioclimáticas (Stierstorfer, 2005; Aeschmann, 2021). Lamentablemente, hasta la fecha no ha sido posible ni estimar ni ofrecer una cifra concreta sobre la cantidad adicional de precipitación que este tipo de evento aporta en El Hierro (Caballero Fernández, 2024) aunque sí existen estimaciones para otras islas, como Tenerife (Marzol Jaén; Sánchez Megía, 2008).

Aunque no contamos con mediciones directas, hemos identificado áreas más propensas a este tipo de precipitación, concentradas en las zonas más elevadas del noreste de la isla (Figura 6).

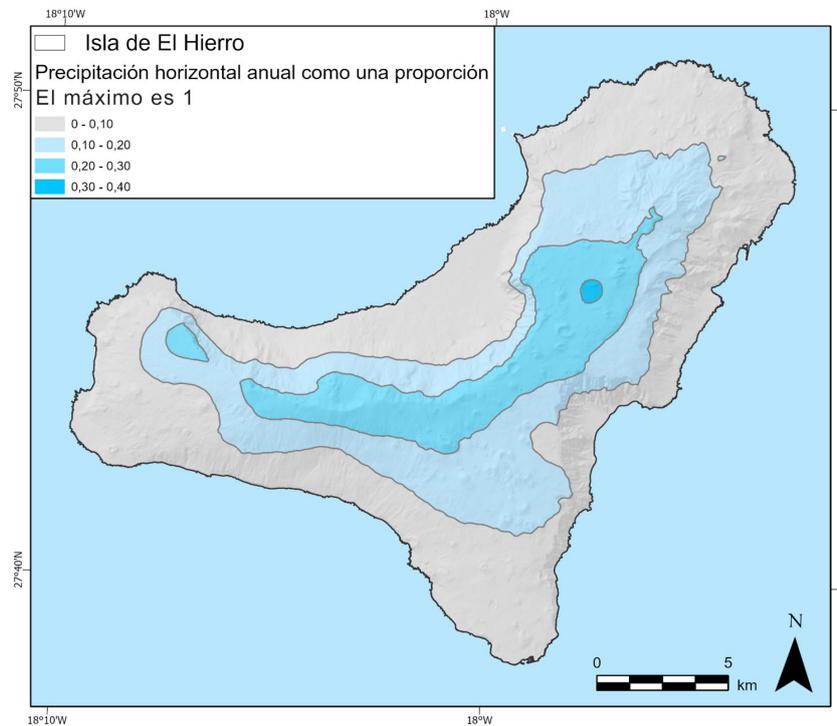


Figura 6 – Áreas más propensas a la precipitación horizontal. **Fuente:** Elaboración propia.

En el futuro, sería interesante adaptar el método de Rivas-Martínez et al. (2002) a la isla, empleando registros climáticos de la última normal climática, con datos de una mayor cantidad de estaciones, e incorporando más mapas al análisis.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio evidencian la notable diversidad climática de la isla de El Hierro, que, a pesar de su pequeña extensión, presenta fuertes contrastes geoespaciales

La utilización de datos climáticos referentes a la última normal climática (1991-2020), y aplicando el método TRB, indica que el régimen tropical y árido, con temperaturas medias mensuales que no descienden de los 18 °C ningún mes y una paralización vegetativa entre los 5-8 meses, ya estaría presente en una parte sustancial del territorio, abarcando aproximadamente el 11% de la superficie. Estos resultados sugieren que regímenes bioclimáticos propios de latitudes inferiores están cada vez más presentes en Canarias.

Es relevante mencionar el hallazgo de un subtipo tropófilo, menos árido, en áreas dispersas de las partes más elevadas de la isla (0,45%), aunque requiere validación. Este subtipo ha sido registrado hasta ahora solo en islas de mayor altitud, como en La Palma. También se ha identificado un euritermo xerófilo subhúmedo seco, que hasta ahora no había sido calculado en la isla, ocupando el 20% del territorio. Este último subtipo sí se ha identificado en algunas de las estaciones utilizadas en esta investigación.

El previsible incremento de la aridez, desplazamiento altitudinal de los subtipos e irrupción de características cada vez más tropicales pone en riesgo ecosistemas emblemáticos como

los bosques termófilos, los cuales son vulnerables a la escasez prolongada de agua. Estos bosques se concentran en los dos subtipos más comunes en la isla: el euritermo xerófilo árido (39%) y semiárido (28%).

La interpolación mediante Kriging Universal (KU) ha demostrado ser una herramienta eficaz para adaptar el método TRB, mejorando las predicciones al incluir variables topográficas externas, especialmente en un entorno insular donde los cambios son abruptos. Esta técnica de interpolación espacial ha permitido generar mapas de calidad y en detalle, contribuyendo a mejorar y actualizar los escasos estudios bioclimáticos realizados previamente sobre la isla.

Con este trabajo, se busca poner en valor la metodología TRB en un territorio de pequeño tamaño, que permite trabajar con escalas de detalle y que es una isla que alberga ecosistemas únicos y frágiles. Este método puede ayudar a una mejor gestión y conocimiento de este entorno ante un escenario de cambio global.

REFERENCIAS

- AESCHIMANN, D. **Flore et végétation sur l'île d'El Hierro**: canaries. Bussigny: Rossolis, 2021.
- CABALLERO, W.; GIRALDO, R.; MATEU, J. A universal kriging approach for spatial functional data. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Heidelberg, v. 27, n. 7, p. 1553-1563, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00477-013-0691-4>.
- CABALLERO FERNÁNDEZ, D.; Estimation of horizontal precipitation on the island of El Hierro (Canary Islands). In: INTERNATIONAL GEOGRAPHICAL CONGRESS, 35., 2024, Dublin, Ireland. **Proceedings [...]**. Dublin: Geographical Society of Ireland, 2024.
- CÁMARA ARTIGAS, R.; DÍAZ DEL OLMO, F; MARTÍNEZ BATLLE, J. R. TBRs, a methodology for the multi-scalar cartographic analysis of the distribution of plant formations. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, España, n. 85, p. 1-38, 2020.
- CANTET, P. Mapping the mean monthly precipitation of a small island using kriging with external drifts. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 127, n. 1-2, p. 31-44, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00704-015-1610-z>.
- CARRACEDO, J. C. *et al.* **Excursion guidebook**. Geology of the island of El Hierro, Canary islands: stratigraphy, volcanology and structure. Gran Canaria: Estación Volcanológica de Canarias (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) and the Depto. Física-geología, 1997.
- CHAZARRA BERNABÉ, A. **Interpolación espacial de la temperatura mínima diaria mediante Kriging universal**. Oviedo: Asociación Meteorológica Española, 2014.
- CLEMENTS, F. E. **Greek and Latin in biological nomenclature**. Lincoln: University of Nebraska, 1909.
- CUI, D. *et al.* A 1 km global dataset of historical (1979-2013) and future (2020-2100) Köppen-Geiger climate classification and bioclimatic variables. **Earth System Science Data**, Göttingen, v. 13, n. 11, p. 5087-5114, 2021. DOI: <http://doi.org/10.5194/essd-13-5087-2021>.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J.; ACEBES, J. R.; PÉREZ DE PAZ, P. L. Bioclimatology and climatophilous vegetation of the Island of Hierro (Canary Islands). **Phytocoenologia**, Stuttgart, v. 26, n. 4, p. 445-479, 1996. DOI: <http://doi.org/10.1127/phyto/26/1996/445>.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J. *et al.* Bioclimatology and climatophilous vegetation of Hierro (part 2) and La Palma (Canary Islands). **Phytocoenologia**, Stuttgart, v. 29, n. 2, p. 253-290, 1999.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J. *et al.* Bioclimatology and climatophilous vegetation of Gran Canaria (Canary Islands). **Annales Botanici Fennici**, Helsinki, v. 39, n. 1, p. 15-41, 2002.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J. *et al.* Bioclimatology and climatophilous vegetation of Tenerife (Canary Islands). **Annales Botanici Fennici**, Helsinki, v. 43, n. 3, p. 167-192, 2006.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J. *et al.* Bioclimatology and climatophilous vegetation of Gomera (Canary Islands). **Annales Botanici Fennici**, Helsinki, v. 46, n. 3, p. 161-191, 2009.
- DEL ARCO AGUILAR, M. J.; RODRÍGUEZ DELGADO, O. **Vegetation of the Canary Islands**. Cham: Springer, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-77255-4>.

DORTA ANTEQUERA, P. J. Catálogo de riesgos climáticos en Canarias: amenazas y vulnerabilidad. **Geographicalia**, Zaragoza, n. 51, p. 133-160, 2007. DOI: http://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2007511118.

DRUDE, O. **Handbuch der pflanzengeographie**. Stuttgart: Verlag Von J. Engerlhorn, 1890. v. 7.

GARZÓN MACHADO, V.; OTTO, R.; DEL ARCO AGUILAR, M. J. Bioclimatic and vegetation mapping of a topographically complex oceanic island applying different interpolation techniques. **International Journal of Biometeorology**, Berlin, v. 58, n. 5, p. 887-899, 2014. PMID:23686111.

GEROLDINGER, A. *et al.* Leave-one-out cross-validation, penalization, and differential bias of some prediction model performance measures: a simulation study. **Diagnostic and Prognostic Research**, London, v. 7, n. 1, p. 9, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1186/s41512-023-00146-0>. PMID:37127679.

GUIJARRO, J. A. **User's guide of the climatol R Package (version 4.1.1)**. 2024. Disponible en: <https://climatol.eu>. Accedido en: 1 Oct 2024.

HUGUET DEL VILLAR, E. **Geobotánica**. Barcelona: Labor, 1929.

IZQUIERDO, T.; MÁRQUEZ, A. Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas. **GEOGACETA**, Salamanca, n. 40, p. 307-310, 2006.

IZQUIERDO, T.; MÁRQUEZ, A. Estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación en la isla de La Gomera (Islas Canarias): evaluación de la incorporación de la altura. **GEOGACETA**, Salamanca, n. 42, p. 131-134, 2007.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Das geographische system de klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (ed.) **Handbuch der klimatologie**. Berlin: Verlag Gebrüder Borntrager, 1936.

LUQUE SÖLLHEIM, Á. L.; MÁYER SUAREZ, P.; GARCÍA HERNÁNDEZ, F. The digital climate atlas of the Canary Islands: a tool to improve knowledge of climate and temperature and precipitation trends in the Atlantic islands. **Climate Services**, Amsterdam, v. 34, p. 100487, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100487>.

MARZOL JAÉN, M. V.; SÁNCHEZ MEGÍA, J. L. **El potencial hídrico de los stratocumulus subtropicales: el caso de Canarias y Marruecos**. Zaragoza: Asociación Meteorológica Española, 2008.

MARZOL JAÉN, M. V.; MÁYER SUÁREZ, P. Algunas reflexiones acerca del clima de las Islas Canarias. **Nimbus: Revista de Climatología, Meteorología y Paisaje**, Almería, n. 29-30, p. 399-416, 2012.

MASSARELLI, C.; CAMPANALE, C. Climatic, bioclimatic, and pedological influences on the vegetation classification of "Bosco dell'Incoronata" in Southern Italy. **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, Rome, v. 34, n. 2, p. 537-552, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12210-023-01146-4>.

MAYER SUÁREZ, P.; LUQUE SÖLLHEIM, Á. L.; GARCÍA HERNÁNDEZ, F. **Atlas climático interactivo de Canarias de alta resolución espacial: fuentes de datos, metodología y resultados**. Canarias: Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente de la ULPGC, Grafcan, SA y Consejería de Transición Ecológica Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial del Gobierno autónomo de Canarias, 2022.

MAYER SUÁREZ, P.; MARZOL JAÉN, V. **Análisis de la pluviosidad en las Islas Canarias mediante la elaboración de gradientes**. Palma de Mallorca: Universitat de les Illes Balears, 2013. p. 145-154.

MESQUITA, S.; SOUSA, A. J. Bioclimatic mapping using geostatistical approaches: Application to mainland Portugal. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 29, n. 14, p. 2156-2170, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1002/joc.1837>.

MONTERO DE BURGOS, J. L.; GONZÁLEZ REBOLLAR, J. L. **Diagramas bioclimáticos**. Madrid: Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), 1974.

MOKARI, E. *et al.* Estimation of daily reference evapotranspiration with limited climatic data using machine learning approaches across different climate zones in New Mexico. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 147, n. 1-2, p. 575-587, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00704-021-03855-y>.

MORALES MATOS, G.; PÉREZ GONZÁLEZ, M. **Gran atlas temático de Canarias**. Tenerife: Interinsular Canaria, 2000.

PADRÓN PADRÓN, P. A. *et al.* Evaluación de los suelos de la isla de El Hierro como recurso natural. I. Distribución ambiental. **Vieraea**, Santa Cruz de Tenerife, n. 19, p. 349-364. 1990.

PADRÓN PADRÓN, P. A. **Estudio edafoambiental de la isla de el hierro**. 1993. Tesis (Doctoral en Ciencias del Suelo) – Universidad de la Laguna, San Cristobal de la Laguna, 1993.

PEBESMA, E.; GRAELER, B. **Package "gstat"**. 2024. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/gstat/index.html>. Accedido en: 2 Oct 2024.

PESARESI, S. *et al.* Bioclimate of Italy: application of the worldwide bioclimatic classification system. **Journal of Maps**, London, v. 10, n. 4, p. 538-553, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1080/17445647.2014.891472>.

- PHAM, T. M. *et al.* Application of the Worldwide Bioclimatic Classification System to determine bioclimatic features and potential natural vegetation distribution in Van Chan district, Vietnam. **Tropical Ecology**, Dehradun, v. 64, n. 4, p. 765-780, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42965-023-00300-1>.
- RIVAS MARTÍNEZ, S. Clasificación bioclimática de la Tierra. **Folia Botanica Matriensis**, Budapest, n. 16, p. 29, 1995.
- RIVAS MARTÍNEZ, S.; RIVAS SÁENZ, S.; PENAS, A. **Worldwide bioclimatic classification system**. Kerkwerve: Backhuys Pub, 2002.
- SALVÀ CATARINEU, M. *et al.* On the detection of thermohygro-metric differences of *Juniperus turbinata* habitat between north and south faces in the island of El Hierro (Canary Islands). In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE, 2016, Vienna, Austria. **Abstracts [...]**. Vienna: EGU sphere, 2016. v. 18.
- SANTRA, P.; KUMAR, M.; PANWAR, N. Digital soil mapping of sand content in arid western India through geostatistical approaches. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 9, p. 56-72, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.003>.
- SERRANO-NOTIVOLI, R.; LONGARES, L. A.; CÁMARA ARTIGAS, R. bioclim: an R package for bioclimatic classifications via adaptive water balance. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 71, p. 101810, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101810>.
- STIERSTORFER, C. **The vascular plant vegetation in the forest belt of El Hierro (Canary Islands)**. Berlin: J. Cramer, 2005.
- THORNTHWAITE, C. W. The climates of the earth. **Geographical Review**, Hoboken, v. 23, n. 3, p. 433-440, 1933. DOI: <http://doi.org/10.2307/209629>.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Hoboken, v. 38, n. 1, p. 55-59, 1948. DOI: <http://doi.org/10.2307/210739>.
- VEHTARI, A.; GELMAN, A.; GABRY, J. Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. **Statistics and Computing**, Amsterdam, v. 27, n. 5, p. 1413-1432, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11222-016-9696-4>.

Declaración de contribución

Ambos autores contribuyeron por igual a este trabajo.

Editor del artículo

Gustavo Schacht, Sueli Angelo Furlan y Karine Vargas

Recibido: Oct. 15 2024
Aceptado: Nov. 05 2024