

Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile

Federico Luebert^{1,2} f.luebert@fu-berlin.de, Patricio Plissock^{3,4}

RESUMEN

La Región de Valparaíso en su área continental se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo. El análisis de datos de estaciones meteorológicas y de superficies climáticas, sugiere que la altitud y la posición topográfica respecto a la Cordillera de los Andes y de la Costa determinan la variación del clima al interior de la región. Proyecciones de cambio climático en el área continental de la Región indican, en general, una tendencia al aumento de las temperaturas y a una disminución de las precipitaciones. Basándose en análisis de conglomerados, cinco bioclimas pueden reconocerse dentro del área continental de la Región de Valparaíso: bioclima costero, bioclima interior, bioclima de serranías interiores, bioclima pre-andino y bioclima andino. El área insular del Archipiélago de Juan Fernández también se encuentra bajo la influencia de clima mediterráneo, aunque bajo condiciones más húmedas que el área continental. La Isla de Pascua presenta un bioclima tropical. Cada bioclima es brevemente descrito de acuerdo a su ubicación y características climáticas y vegetacionales.

Palabras clave: Bioclimatología, clima, Isla de Pascua, Juan Fernández, Mediterráneo, Vegetación.

Bioclimates of the Valparaíso Region, Chile

ABSTRACT

The Valparaíso Region in its continental area is located under the influence of a Mediterranean climate. Analyses of data from meteorological stations and climatic surfaces suggest that elevation and topographical position respect to Andes and Coastal Cordilleras determine the climatic variation within the Region. Climate change projections in the continental area indicate a general trend to an increase of temperature and a decrease of precipitation. Based on cluster analyses, five bioclimates can be recognised in the continental area of the Region of Valparaíso: coastal bioclimate, inland bioclimate, inland mountain bioclimate, pre-Andean and Andean bioclimate. The insular area of the Juan Fernández Archipelago is also under the influence of a Mediterranean climate, although with more humid conditions than in the continental area. Easter Island has a tropical bioclimate. Each bioclimate is briefly described in terms of distribution, and climatic and vegetation features.

Keywords: Bioclimatology, climate, Easter Island, Juan Fernández, Mediterranean, Vegetation.

Recibido el 2 de julio de 2012, aceptado el 14 de diciembre de 2012.

¹ Freie Universität Berlin, Institut für Biologie – Botanik, Altensteinstr. 6 D-14195 Berlin, Alemania

² Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, Santiago.

³ Université de Lausanne, Department of Ecology and Evolution, Lausanne, Suiza.

⁴ Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago.

INTRODUCCIÓN

La región de Valparaíso se encuentra localizada en el contexto climático de Chile central, la que es una de las cinco regiones del planeta bajo la influencia de un clima tipo mediterráneo (BRECKLE & WALTER 2002). El clima mediterráneo, independiente de su ubicación en el planeta, se puede caracterizar por un régimen estacional de precipitaciones y temperaturas, con una estación invernal fría y húmeda, y una estación estival cálida y seca (ASCHMANN 1984). La condición de húmedo y seco es usualmente evaluada a través del uso de algún indicador de balance hídrico, como la relación entre la precipitación (P , medida en mm) y el doble del valor de la temperatura media (T , medida en °C), donde $P < 2T$ indica un balance hídrico negativo (GAUSSEN & BAGNOULS 1953), que permite definir una estación como seca. Otra aproximación es la relación entre las precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP, medida en mm), en que $P < ETP$ indica un balance hídrico negativo (THORNTHWAITE 1948). La intensidad de la estación seca, medida por la magnitud del balance hídrico o por su duración (en meses) permite dividir el clima mediterráneo en clases de humedad o régimen ombroclimático (DAGET 1977). Análogamente, la variación de las temperaturas dentro del clima mediterráneo, permite dividirlo en clases térmicas o régimen termoclimático (RIVAS-MARTÍNEZ 2008).

Diversos estudios se han ocupado de la variación ombro- y termoclimática del clima mediterráneo en Chile (e.g., QUINTANILLA 1974, DI CASTRI & HAJEK 1975, ROMERO 1985, AMIGO & RAMÍREZ 1998, LUEBERT & PLISCOFF 2006a; para una revisión véase LUEBERT & PLISCOFF 2006b). Dos patrones claros son unánimemente reconocidos. El primero es una variación

latitudinal del régimen ombroclimático, con un gradiente de humedad en el que el balance hídrico se incrementa de norte a sur. El segundo es una variación latitudinal del régimen termoclimático, en el que las temperaturas tienden a disminuir de norte a sur. Probablemente debido a la escasez de estaciones meteorológicas en localidades de altitud (AMIGO & RAMÍREZ 1998) y a la forma en que algunos autores circunscriben el clima mediterráneo en Chile (LUEBERT & PLISCOFF 2006b), la variación altitudinal de precipitaciones y temperaturas a escala suprarregional dentro del clima mediterráneo es sólo parcialmente reconocida en la literatura.

El propósito de este trabajo es caracterizar el clima del área continental de la Región de Valparaíso en términos de la variación espacial y temporal de variables de importancia biológica y proponer una clasificación de los bioclimas de la región basándose en análisis de conglomerados. Los bioclimas se caracterizan en términos de sus parámetros climáticos y vegetación zonal dominante. Adicionalmente se caracterizan los bioclimas del área insular.

MATERIALES Y MÉTODOS

La variación climática de la Región de Valparaíso (excluyendo el área insular) se puede expresar utilizando distintos tipos de variables. Para ello se seleccionaron las siguientes variables: temperaturas, precipitaciones, evapotranspiración potencial, y balance hídrico. Las temperaturas se consideran a través de la temperatura media anual (T), de la temperatura media del mes más cálido (T_{max}), temperatura media del mes más frío (T_{min}) y del índice de continentalidad ($I_c = T_{max} - T_{min}$), que corresponde a la amplitud térmica anual. La precipitación es considerada a través de la precipitación media anual (P) y estival

(Pv), expresadas en mm, mientras que la evapotranspiración potencial anual (ETP) y estival (ETPv), también expresada en mm, se calculó de acuerdo con la fórmula de Thornthwaite (1948). El balance hídrico es expresado a través del índice de aridez ($AI = P / ETP$, MIDDLETON & THOMAS 1992), donde $AI > 1$ indica un balance hídrico positivo y $AI < 1$, negativo.

Los bioclimas del área continental de la Región de Valparaíso se identificaron mediante un análisis de conglomerados siguiendo el método de medias migrantes (RICHARDS & JIA 2006). Las variables climáticas consideradas para la definición de los conglomerados fueron temperatura media (T), temperatura media máxima (M), temperatura media mínima (m), precipitación media (P), además de las unidades de vegetación de LUEBERT & PLISCOFF (2006a) en el nivel de formación vegetacional (véase también PLISCOFF & LUEBERT 2008). Para cada una de las cuatro variables climáticas, se seleccionaron las correspondientes a un mes en cada estación del año (Enero=Verano, Abril=Otoño, Julio=Invierno, Octubre=Primavera). Lo anterior permite identificar unidades espaciales con características similares de clima y vegetación, basándose en la distribución de los valores en las 17 variables seleccionadas (16 variables climáticas mensuales más una variable que da cuenta de la formación vegetacional).

Para analizar las proyecciones futuras de la variación temporal del clima en la región de Valparaíso, se estimaron los valores de anomalías para las variables de temperatura media anual y precipitación anual comparando la distribución actual de la temperatura y precipitación con dos escenarios de emisión, A2 y B2, de acuerdo al Informe del IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2007), que están

basados en el modelo de circulación global HadCM3 (GORDON *et al.* 2000) para el año 2080. Estos dos escenarios corresponden a la expresión a escala global de un conjunto de escenarios regionales de crecimiento socio-económico, que se traducen en distintas trayectorias de la evolución de las emisiones de gases invernadero y de su concentración en la atmósfera. El escenario A2 asume un aumento constante de las emisiones, mientras en el B2 los valores se mantienen constantes a través del tiempo. Los valores futuros de las variables se obtuvieron de la página WEB de proyección de cambio climático del CIAT (<http://www.ccafs-climate.org/data/>), y posteriormente se aplicó el método delta (RAMIREZ & JARVIS 2010) para el cálculo de las anomalías entre los valores actuales y los escenarios de las proyecciones del modelo HadCM3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución espacial de variables climáticas en la Región de Valparaíso

Los valores de estas variables e índices en una selección de estaciones meteorológicas de la Región de Valparaíso se presentan en la Tabla 1. Los diagramas ombrotérmicos de la Fig. 1A-M, ilustran la variación de precipitaciones y temperaturas a lo largo del año en 13 estaciones meteorológicas de la Región de Valparaíso (localización de las estaciones en la Región en figura 2). Todas ellas muestran la presencia una estación estival seca, característica del clima mediterráneo. Las estaciones del área insular de la Región de Valparaíso, Juan Fernández e Isla de Pascua, están bajo la influencia de clima mediterráneo en el primer caso (Fig. 1N) y de clima tropical en el segundo (Fig. 1O), este último con reducida estacionalidad y sin meses con balance hídrico negativo.

TABLA 1. VARIABLES E ÍNDICES CLIMÁTICOS DE UNA SELECCIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO. BIO, BIOCLIMAS; C, COSTERO, I, INTERIOR, SI, SERRANÍAS INTERIORES, P, PREANDINO, A, ANDINO, M, MEDITERRÁNEO INSULAR, T, TROPICAL INSULAR. FUENTE: 1, FAO (1985); 2, INIA (1989); 3, HAJEK & DI CASTRI (1975); 4, DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE

TABLE 1. CLIMATIC VARIABLES AND INDICES OF SELECTED METEOROLOGICAL STATIONS IN THE VALPARAÍSO REGION. BIO, BIOCLIMATES; C, COASTAL; I, INLAND; SI, INLAND MOUNTAINS; P, ANDEAN FOOTHILLS; A, ANDEAN; M, MEDITERRANEAN INSULAR; T, TROPICAL INSULAR. SOURCES: 1, FAO (1985); 2, INIA (1989); 3, HAJEK & DI CASTRI (1975); 4, DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE

Estación	Lat. S	Lon. W	Alt. (m)	T	Tmin	Tmax	P	Pv	ETP	ETPv	Ic	Al	Alv	Bio	Fuente
Alicahue	32°19'	70°47'	885	8.6	2.8	13.6	324	6	569	226	10.8	0.57	0.03	SI	2
La Ligua	32°27'	71°16'	58	14.4	10.5	18.5	342	8	698	244	8.0	0.49	0.03	C	2
Zapallar	32°33'	71°30'	30	14.2	11.2	17.7	384	6	693	253	6.5	0.55	0.02	C	3
Baños de Jahuel	32°41'	70°39'	1180	15.6	9.9	22.0	305	11	759	325	12.1	0.40	0.03	I	3
Los Andes	32°50'	70°37'	816	15.2	8.6	21.9	305	11	755	329	13.3	0.40	0.03	I	1
Cristo Redentor	32°50'	70°4'	3850	-1.4	-6.9	3.8	902	2	304	241	10.7	2.97	0.01	A	2
Llay-Llay	32°50'	70°59'	385	14.3	8.9	19.2	387	1	710	282	10.3	0.55	0.00	I	3
Juncal	32°52'	70°10'	2250	9.3	4.3	15.2	287	33	586	246	10.9	0.49	0.13	P	3
Quillota	32°53'	71°16'	435	14.3	10.2	18.5	435	12	704	268	8.3	0.62	0.04	I	1
Valparaíso	33°2'	71°37'	41	14.4	11.4	17.8	351	3	701	253	6.4	0.50	0.01	C	1
Quilpué	33°4'	71°30'	101	14.4	9.9	19.1	588	13	712	280	9.2	0.83	0.05	C	3
Peñablanca	33°4'	71°23'	154	14.9	9.7	19.8	382	5	726	286	10.1	0.53	0.02	C	3
Santo Domingo	33°36'	71°38'	71	12.4	8.9	15.9	471	6	652	238	7.0	0.72	0.02	C	4
*Juan Fernández	33°37'	78°49'	6	15.3	12.0	18.9	998	123	720	256	6.9	1.39	0.48	M	1
*Mataverí	27°10'	109°26'	41	20.4	18.1	23.3	1091	241	932	316	5.2	1.17	0.76	T	1

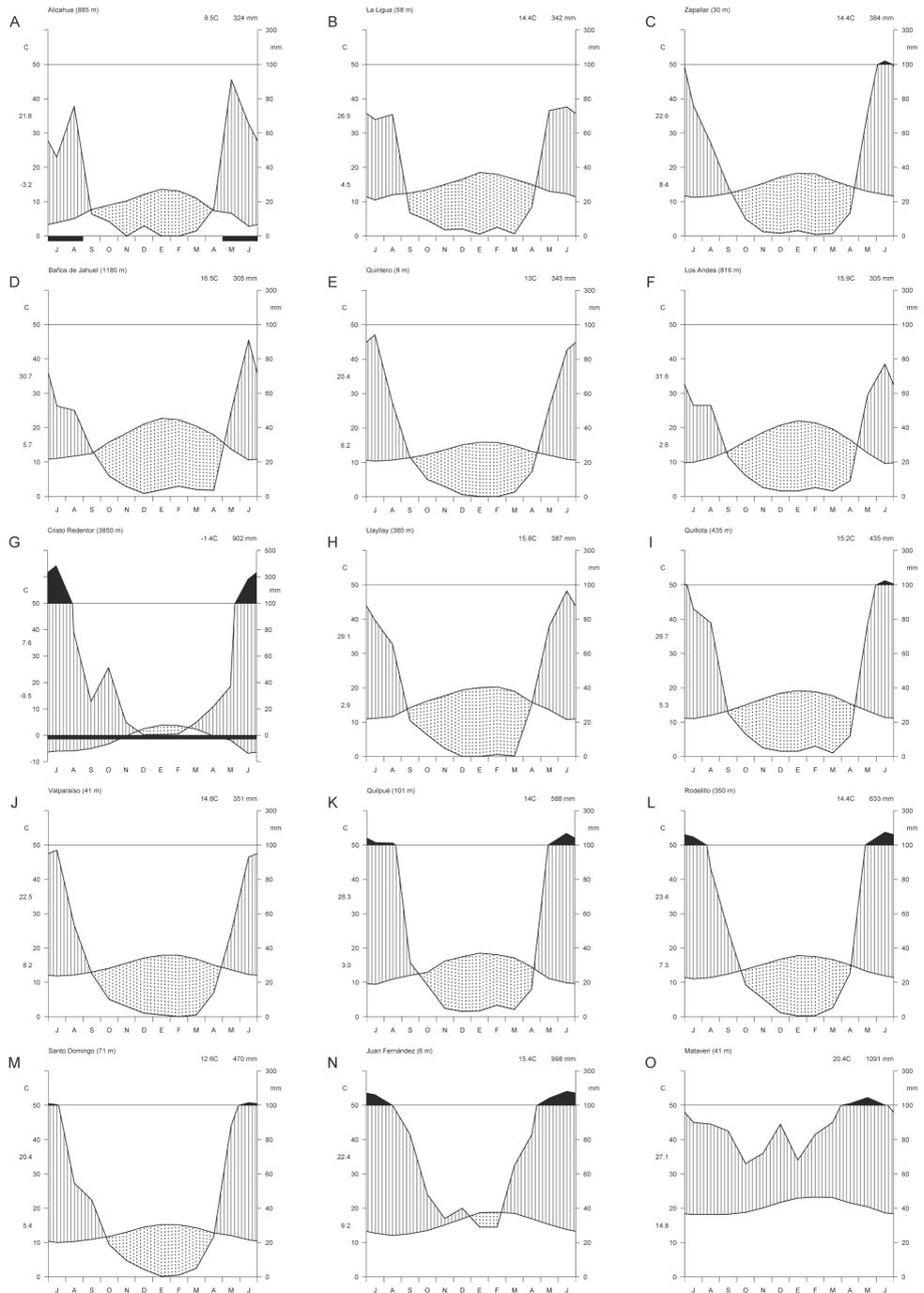


Fig. 1. Diagramas ombrotérmicos de WALTER & LIETH (1967) de estaciones meteorológicas del área continental (A-M) e insular (N-O) de la Región de Valparaíso.

Fig. 1. Ombrothermic diagrams of WALTER & LIETH (1967) of weather stations from continental area (A-M) and insular (N-O) in the Region of Valparaíso.

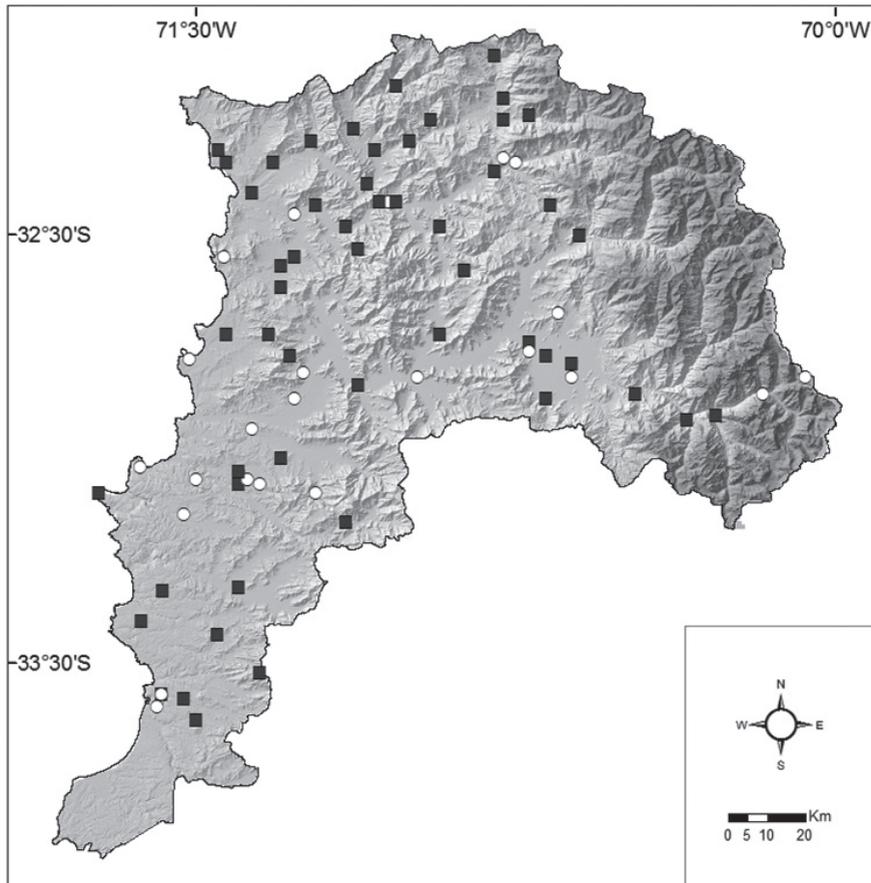


Fig. 2. Ubicación de estaciones meteorológicas en la Región de Valparaíso, indicando estaciones con datos solamente de precipitación (cuadrados), y estaciones con ambos datos de precipitación y temperatura (círculos).

Fig. 2. Location of meteorological stations in the Valparaíso Region, indicating stations with only precipitation data (squares), and stations with both precipitation and temperature data (circles).

La variación de temperaturas y precipitaciones dentro del área continental de la Región de Valparaíso, está fundamentalmente determinada por la elevación y la ubicación geográfica respecto a las dos principales cadenas montañosas, cordilleras de la Costa y de los Andes. Para efectos prácticos se consideraron tres grandes unidades geomorfológicas: (1) Vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, incluyendo planicies litorales, (2) Depresión intermedia, incluyendo la vertiente oriental de la Cordillera de la

Costa, y (3) Vertiente occidental de la Cordillera de los Andes sobre 1000 m de elevación.

Las temperaturas tienden a disminuir con la elevación (Fig. 3A). La oscilación de las temperaturas a lo largo de los años está fuertemente controlada por la distancia al mar. La amplitud térmica anual (I_c) tiende a aumentar hacia el interior de la Región (Fig. 4B), aunque las estaciones meteorológicas con más alta continentalidad se encuentran en la Depresión intermedia (Fig. 3B).

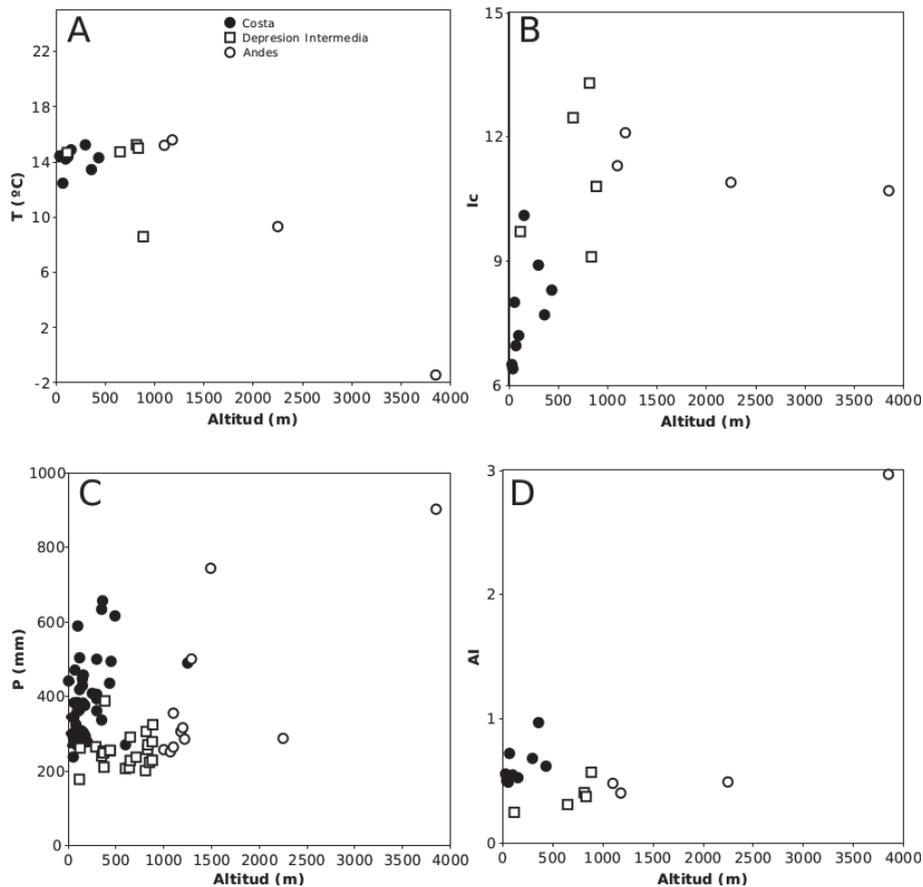


Fig. 3. Variación de la temperatura media anual (A), índice de continentalidad (B), Precipitación media anual (C) e índice de aridez (D) según altitud y unidades geomorfológicas, de acuerdo con los datos de estaciones meteorológicas de la Región de Valparaíso.

Fig. 3. Change in mean annual temperature (A), continentality index (B), mean annual precipitation (C) and aridity index (D) according to altitude and geomorphological units, in according to meteorological stations data from the Valparaíso Region.

Las precipitaciones tienden a aumentar con la elevación (Fig. 3C) debido a la mayor condensación de las masas de aire a menores temperaturas. Sin embargo, el patrón es más complejo porque las elevaciones de la Cordillera de la costa producen un efecto de sombra de lluvias que determina montos de precipitación a sotavento de la Cordillera de la Costa más bajos de los esperados debido a su altitud (Figs. 3C y 4C), generando condiciones de

mayor aridez en la depresión intermedia, que es a su vez el área que presenta mayores montos de evapotranspiración potencial (Fig. 4D), lo que produce un balance hídrico negativo (Figs. 3D y 4E). La fisonomía de la vegetación en la depresión intermedia corresponde a un matorral o bosque espinoso, donde *Acacia caven* es la especie dominante (LUEBERT & PLISCOFF 2006a).

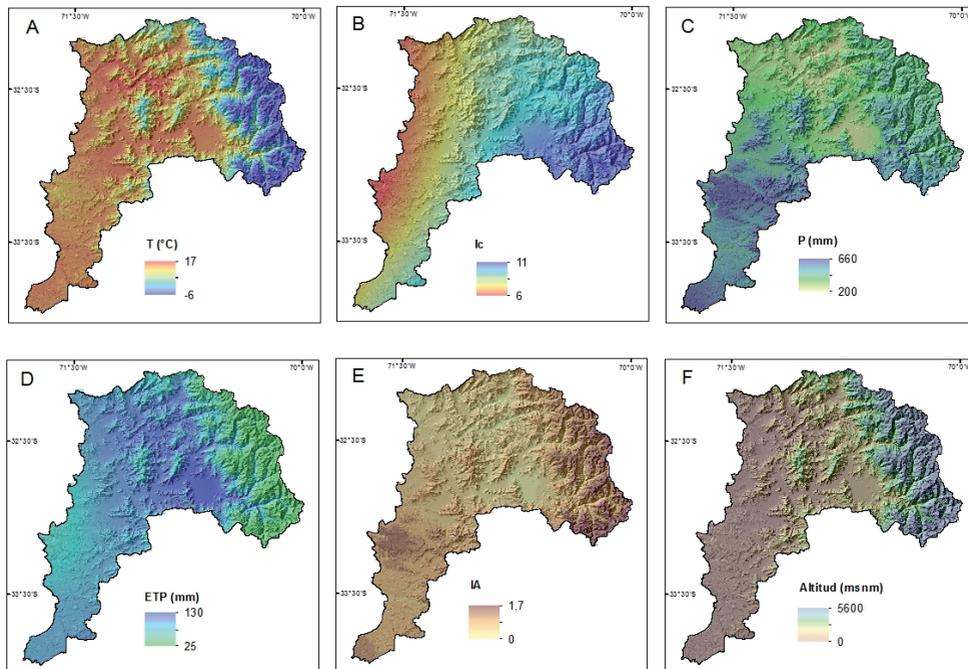


Fig. 4. Distribución espacial de las variables climáticas en la Región de Valparaíso. A, Temperatura media anual (T); B, Índice de Continentalidad (Ic); C, Precipitación media anual (P); D, Evapotranspiración potencial (ETP); E, Índice de Aridez (IA); F, Altitud.

Fig. 4. Spatial distribution of climatic variables in the Valparaíso Region. A, mean annual temperature (T); B, continuity index (Ic); C, mean annual precipitation (P); D, potential evapotranspiration (PET); E, Aridity Index (AI); F, Altitude.

La áreas con mayores precipitaciones se encuentran en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, especialmente a barlovento de los sectores más elevados cercanos a la costa (Fig. 4C), que corresponden a los macizos montañosos de El Roble – La Campana y Cantillana. Estos sectores presentan balances hídricos positivos asociados a temperaturas moderadas (Figs. 3-4), lo que permite la presencia de bosques esclerófilos con abundantes elementos laurifolios (e.g., *Aextoxicon punctatum*, *Beilschmiedia miersii*, *Drimys winteri*, *Persea lingue*, *Peumus boldus*) en las partes más bajas,

y de bosques caducifolios de *Nothofagus macrocarpa* en las áreas más elevadas (LUEBERT *et al.* 2002).

La alta cordillera andina presenta los valores más bajos de temperaturas, asociados a una baja evapotranspiración potencial, lo que asociado a precipitaciones moderadas determinan un balance hídrico positivo (véase Figs. 3D y 4E). La vegetación corresponde a matorrales bajos, pajonales o herbazales de altitud (LUEBERT & PLISCOFF 2006a), formaciones que también se pueden encontrar en las cumbres más elevadas de la Cordillera de la Costa.

El clima local en la Región de Valparaíso varía de acuerdo con la exposición. Exposiciones norte (solana) presentan mayor insolación y por lo tanto mayor evapotranspiración, y un balance hídrico más negativo que exposiciones sur (umbría) (PLISCOFF 2002), lo que se relaciona con la fisionomía y composición de la vegetación, más xerofítica en exposiciones norte y más ombrofítica en exposiciones sur (ARMESTO & MARTÍNEZ 1978, LUEBERT *et al.* 2002, LUEBERT & PLISCOFF 2006a).

VARIACIÓN TEMPORAL DEL CLIMA EN LA REGIÓN: CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados indican una disminución de la precipitación y un aumento de las temperaturas en toda la extensión de la región de Valparaíso. Los dos escenarios (A2 y B2) repiten el mismo patrón, pero se diferencian en su magnitud. El escenario A2 presenta mayores montos de disminución de precipitaciones y aumento de temperaturas que el escenario B2.

Para el caso de las precipitaciones anuales (Fig. 5A-B), se observa un patrón de disminución latitudinal en las áreas costera y andina, mientras que en el área interior se observan los menores montos de disminución (80 mm en el escenario A2 y 50 mm en el B2). Los mayores montos se distribuyen en el área costera sur de la región de Valparaíso, alcanzando los -286 mm en el sector de Quilpué, al Este de Valparaíso, en el escenario A2. En el caso de la temperatura media anual (Fig. 5C-D), se observa un patrón longitudinal de aumento, con los menores valores en el área costera en el escenario B2 (1°C), llegando hasta 3.5°C en el área andina del escenario A2. En el escenario B2 el patrón se repite

pero con montos inferiores, alcanzando una variación de 2.4°C en los sectores andinos. Bajo estas condiciones climáticas se podría esperar, en el largo plazo, un desplazamiento altitudinal ascendente de los pisos de vegetación, especialmente del área andina, así como un desplazamiento latitudinal en sentido norte-sur de la vegetación, con la incursión de elementos provenientes de zonas áridas y semi-áridas del centro-norte de Chile, especialmente en el área costera. Lo anterior podría significar una reducción de la vegetación costera e interior de matorrales de altitud, que no encontrarían ambientes para ocupar, dado que no existiría superficie disponible a mayor elevación. Este mismo patrón se ha identificado a nivel de especies, como en el caso del Belloto del Norte (*Beilschmiedia miersii*), en el que su distribución potencial se reduce a sectores de mayor altitud de la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa de la Región (PLISCOFF & FUENTES-CASTILLO 2011). Al mismo tiempo, la disminución de las precipitaciones podría traer como consecuencia la desaparición de las condiciones ambientales apropiadas para las formaciones relictuales de bosques caducifolios en la Cordillera de la Costa, lo que en última instancia podría determinar la extinción local de las comunidades a expensas la expansión de elementos esclerófilos y espinosos más tolerantes a la aridez y que comparten el mismo piso altitudinal. En general, la Región podría experimentar una tendencia a la reducción de la superficie de bosques y a un aumento de la superficie de matorrales.

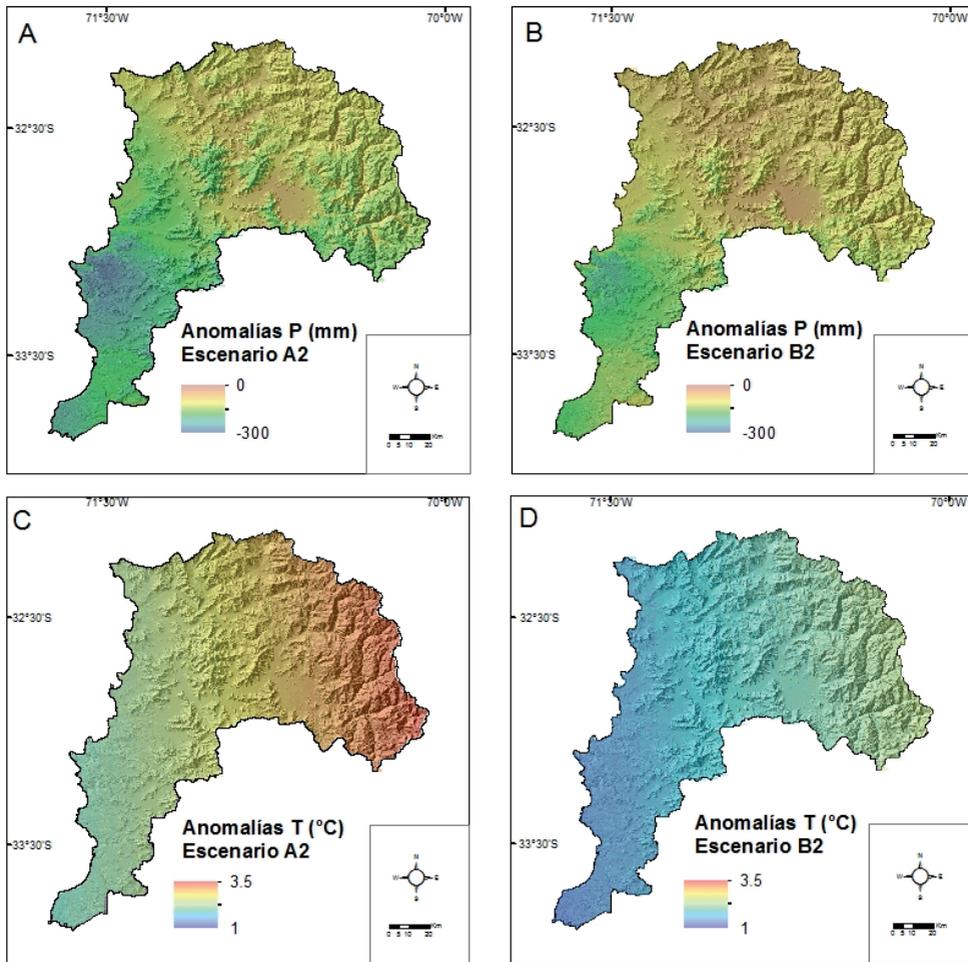


Fig. 5. Anomalías para la precipitación anual (A-B) y para la temperatura media anual (B-C) de acuerdo con los escenarios de cambio climático (A2, B2) al año 2080. Véase texto para interpretación de los escenarios A2 y B2.

Fig. 5. Anomalies in annual precipitation (A-B) and mean annual temperature (B-C) according to climate change scenarios (A2, B2) for the year 2080. See text for interpretation of the A2 and B2 scenarios.

CLASIFICACIÓN DE BIOCLIMAS

La aplicación del análisis de conglomerados permitió identificar 5 unidades en el área continental (Fig. 6), las que se caracterizan a continuación según su distribución espacial en la región y sus características climáticas

y rasgos vegetacionales generales. Para mayor información sobre la vegetación y flora de la Región, el lector es referido a los trabajos de GAJARDO (1994), LUEBERT & PLISCOFF (2006a), MOREIRA-MUÑOZ (2011), y las referencias ahí citadas.

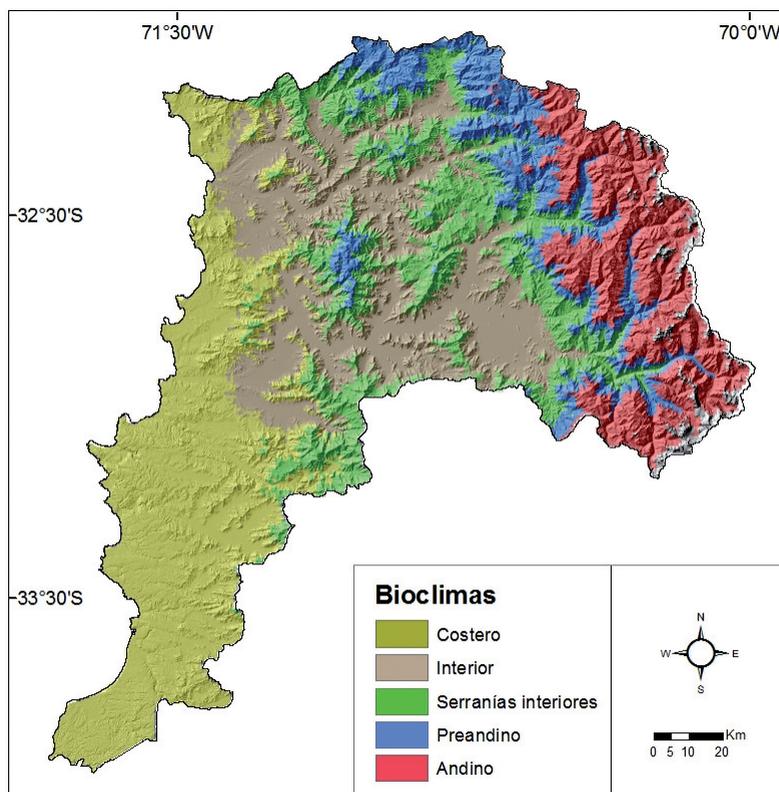


Fig. 6. Bioclimas de la Región de Valparaíso.

Fig. 6. Bioclimates of the Valparaíso Region

Área continental

1. Bioclina costero

Este bioclina se distribuye en las áreas costeras de la Región, preferentemente áreas bajas (0-800 m) de la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa y planicies litorales (Fig. 6). Se caracteriza por temperaturas moderadas (temperatura media anual promedio 14.5°C, amplitud térmica anual promedio 7.5°C) y precipitaciones relativamente altas para la región (precipitación media anual promedio 458 mm). La vegetación predominante corresponde a bosques esclerofilos y a matorrales arborescentes esclerofilos, generalmente dominados por *Cryptocarya alba*, *Lithrea caustica* y *Peumus boldus*.

2. Bioclina interior

Ocupa los sectores más secos de la Región generalmente sometidos a efectos de sombra de lluvia en los sectores más bajos (0-1300 m) y generalmente planos del interior (Fig. 6). Las temperaturas son moderadas (temperatura media anual promedio 14.9°C, amplitud térmica anual promedio 8.6°C) y las precipitaciones alcanzan los valores más bajos para la Región (precipitación media anual promedio 304 mm). La vegetación es un mosaico de bosques y matorrales esclerofilos dominados por *Cryptocarya alba*, *Lithrea caustica* y *Quillaja saponaria*, y de bosques y matorrales espinosos de *Acacia caven*, que alcanzan su máxima expresión en este bioclina.

3. Bioclima de serranías interiores

Este bioclima ocupa las áreas montañosas del interior de la Región, tanto en la Cordillera de la Costa como en los Andes, ocupando un amplio rango altitudinal que oscila entre 600 y 2000 m (Fig. 6). Se caracteriza por temperaturas moderadas a bajas (temperatura media anual promedio 12.1°C, amplitud térmica anual promedio 8.9°C) y precipitaciones relativamente moderadas para la región (precipitación media anual promedio 377 mm). La vegetación predominante corresponde a bosques y matorrales esclerofilos, generalmente dominados por *Cryptocarya alba*, *Lithrea caustica* y *Quillaja saponaria*, así como por *Kageneckia angustifolia*. Los bosques caducifolios de *Nothofagus macrocarpa* presentes en la Región de Valparaíso se encuentran bajo la influencia de este bioclima.

4. Bioclima pre-andino

Este bioclima se ubica preferentemente en los sectores de altitud media de la Cordillera de los Andes y en los sectores más elevados de la Cordillera de la Costa (Fig. 6) a elevaciones que oscilan entre 1500 y 2800 m. Las temperaturas son bajas y la continentalidad alta en comparación con los bioclimas anteriores (temperatura media anual promedio 8.8°C, amplitud térmica anual promedio 9.2°C), pero las precipitaciones tienden a incrementarse en relación con el bioclima interior (precipitación media anual promedio 367 mm). La vegetación predominante corresponde a matorrales bajos dominados por *Chuquiraga oppositifolia* y marginalmente a bosques esclerofilos de *Kageneckia angustifolia*. Matorrales espinosos de *Puya coerulea* también se encuentran presentes en este bioclima.

5. Bioclima andino

Ubicado en los sectores más altas de los Andes (Fig. 6), por sobre los 2600 m, este bioclima presenta bajas temperaturas y alta continentalidad (temperatura media

anual promedio 4.2°C, amplitud térmica anual promedio 9.9°C). Las precipitaciones se incrementan aún más (precipitación media anual promedio 401 mm), aunque sin superar los montos del bioclima costero. La vegetación dominante son matorrales bajos de *Berberis empetrifolia* y *Laretia acaulis*, pajonales dominados por *Stipa chrysophylla*, y herbazales altoandinos. También se encuentran en este bioclima las áreas desprovistas de vegetación por sobre el límite altitudinal de la vegetación vascular.

Área insular

Los bioclimas del área insular de la Región de Valparaíso se identificaron y caracterizaron mediante el examen de los datos de las estaciones meteorológicas correspondientes, que difieren de lo que se observa en el área continental (Fig. 1). En consecuencia, se identifica un bioclima para Masafuera (Archipiélago de Juan Fernández) y uno para la Isla de Pascua. Para un análisis en las otras áreas insulares de la Región de Valparaíso, los autores no cuentan con los datos climáticos necesarios.

1. Bioclima mediterráneo en Masafuera

A pesar de recibir mayores precipitaciones que cualquiera de las estaciones continentales de la Región de Valparaíso (Tabla 1), presenta un periodo estival con balance hídrico negativo (Fig. 1N). La continentalidad es baja debido a la influencia oceánica, similar a lo que se observa en las estaciones continentales costeras de la Región. La vegetación corresponde a bosques laurifolios (GAJARDO 1994), aunque debido a la influencia orográfica, algunos sectores de la isla presentan un vegetación xérica con pajonales (GREIMLER *et al.* 2002).

2. Bioclima tropical en la Isla de Pascua

En este bioclima las temperaturas medias mensuales nunca bajan de 18°C (Fig. 10) y la continentalidad es muy baja debido a la influencia oceánica (Tabla 1). La

precipitaciones son relativamente constantes a lo largo del año, sin meses con déficit hídrico (Fig. 10). La vegetación natural corresponde a pastizales y está actualmente desprovista de vegetación leñosa nativa, de la que los últimos remanentes de bosques bajos se encontraban a principios del siglo XX confinados a una pequeña parte de la isla (SKOTTSSBERG 1920).

Comparación con otras clasificaciones

La mayor parte de las clasificaciones nacionales propuestas hasta el momento sitúan a la Región de Valparaíso en la transición entre el clima Mediterráneo y un tipo de clima seco (FUENZALIDA 1965, QUINTANILLA 1974, ROMERO 1985, véase LUEBERT & PLISCOFF 2006b). Esto no es consistente con la definición de clima mediterráneo (véase Introducción), lo que ha llevado a otros autores (DI CASTRI & HAJEK 1975, AMIGO & RAMÍREZ 1998, LUEBERT & PLISCOFF 2006a) a extender su extensión en Chile hacia el norte hasta la Región de Antofagasta, al menos en el área costera y a incluir toda la región de Valparaíso dentro del clima Mediterráneo. De acuerdo con la clasificación de DI CASTRI & HAJEK (1975), La Región de Valparaíso representa la transición latitudinal desde un tipo de bioclima Mediterráneo semi-árido a árido, mientras que en la alta cordillera se identifica la presencia del clima Andino, que constituye un área de tendencia continental “que presenta fluctuaciones térmicas relativamente elevadas y un período de mayor actividad biológica en verano, independientemente del régimen pluviométrico” (DI CASTRI & HAJEK 1975).

La clasificación propuesta en este trabajo tiende a coincidir con DI CASTRI & HAJEK (1975) en la diferenciación de un bioclima andino situado en la alta cordillera. La clasificación bioclimática propuesta en LUEBERT & PLISCOFF (2006a) para Chile incluye dos bioclimas para la región de Valparaíso, mediterráneo xérico-oceánico y mediterráneo pluviestacional-oceánico.

La escala de trabajo y la metodología empleada aquí permiten una mayor diferenciación de los bioclimas al interior de la Región de Valparaíso. Los bioclimas aquí propuestos presentan correspondencias con los descritos por LUEBERT & PLISCOFF (2006a): el bioclima mediterráneo xérico-oceánico de estos autores coincide con la distribución del bioclima interior, y con porciones marginales del bioclima costero y de serranías interiores, descritos en este capítulo. El bioclima pluviestacional-oceánico coincide espacialmente con las unidades de bioclima costero de este trabajo (con la excepción la porción norte), serranías costeras (exceptuando sectores de menor altitud), pre-andino y andino. Estos últimos se corresponden aproximadamente con los pisos bioclimáticos oromediterráneo y crioromediterráneo de LUEBERT & PLISCOFF (2006a), respectivamente. El bioclima de serranías interiores presentado aquí corresponde con el piso bioclimático supramediterráneo, mientras que los bioclimas costero e interior corresponden al piso bioclimático mesomediterráneo de LUEBERT & PLISCOFF (2006a).

La cartografía de distritos bioclimáticos de URIBE *et al.* (2012) no presenta correspondencias aparentes con la clasificación de bioclimas aquí presentada. Ello se debe, posiblemente, a que la propuesta de URIBE *et al.* (2012) está enfocada a su uso en agricultura y por lo tanto hace uso de diferentes variables (por ejemplo días-grados y período libre de heladas) para la definición de distritos bioclimáticos. Sin embargo, en la metodología presentada por URIBE *et al.* (2012) no queda claro cuál fue la metodología empleada para extrapolar espacialmente los datos de las estaciones climáticas, ni para establecer los límites espaciales de las unidades climáticas definidas.

La metodología empleada para la identificación de bioclimas tiene un potencial de aplicación futura a escala nacional y este trabajo puede ser visto como un primer paso para ello. Respecto de otras metodologías empleadas para la identificación de

bioclimas, el análisis de conglomerados presenta ciertas ventajas, como por ejemplo, la clasificación de los climas de acuerdo a un esquema pre-definido, que es el método más comunmente usado (e.g., FUENZALIDA 1965, QUINTANILLA 1974, DI CASTRI & HAJEK 1975, AMIGO & RAMÍREZ 1998, LUEBERT & PLISCOFF 2006a, URIBE *et al.* 2012). En primer lugar, la delimitación de los bioclimas no está influenciada por definiciones *a priori* sobre los rangos de las variables e índices climáticos que determinan los bioclimas. Estas definiciones son usualmente obtenidas de observaciones climáticas que no necesariamente representan la realidad del territorio al que se aplican. La utilización de análisis de conglomerados independientes de definiciones *a priori* puede también considerarse una desventaja, por cuanto limita las posibilidades de realizar análisis comparativos entre diferentes regiones. Por otra parte, el análisis de conglomerados genera estimaciones a escala más detallada que otras metodologías aplicadas hasta ahora y permite reducir la incertidumbre espacial de las diferentes variables climáticas en la predicción de los climas y de los efectos de cambio climático, así como generar clasificaciones que son más representativas de los impactos locales (MAHLSTEIN & KNUTTI 2010).

En tal sentido se ha visto que unidades climáticas derivadas de análisis de conglomerados tienden a coincidir con clasificaciones previas basadas en definiciones *a priori*, pero lo que cambia son los límites espaciales de tales unidades, que es lo que se ha visto en el presente trabajo (véase también por ejemplo UNAL *et al.* 2003). Muchos autores sugieren que la definición del número de unidades que se deriven del análisis de conglomerados es uno de los aspectos más críticos para la clasificación climática, el que puede ser objetivado mediante análisis estadísticos (véase FOVELL & FOVELL 1993, GERSTENGARBE *et al.* 1999, UNAL *et al.* 2003, MAHLSTEIN & KNUTTI 2010). Finalmente se ha visto que el análisis de conglomerados tiene un potencial para

ser usado de manera integrada junto con variables biológicas como la vegetación (ZSCHEISCHLER *et al.* 2012), lo que no sólo permitiría mejorar las estimaciones de unidades climáticas, sino que también co-identificar unidades de vegetación con mayor significado ecológico.

CONCLUSIONES

La variación espacial de las temperaturas y precipitaciones de la Región de Valparaíso está controlada fundamentalmente por la elevación, la orientación respecto de la presencia de las grandes cadenas montañosas, y la distancia al mar. Modelos de cambio climático sugieren una disminución de la precipitación y un aumento de las temperaturas en toda la extensión continental de la región de Valparaíso durante los próximos 70 años, lo que podría implicar, en términos generales, una tendencia a la disminución de la superficie de bosques y un aumento de la superficie de matorrales. Estos cambios son, sin embargo, difíciles de separar de los efectos antrópicos, lo que plantea limitaciones en los alcances e interpretación de resultados de análisis de los efectos de cambio climático sobre la vegetación, especialmente en el mediano plazo. Un análisis de conglomerados permite definir cinco bioclimas en el área continental la Región de Valparaíso, los que se encuentran segregados espacialmente de acuerdo a su localización respecto a los principales elementos que determinan la variación del clima en la Región. La extensión del método de clasificación empleado en este trabajo a todo el territorio nacional permitirá evaluar sus resultados en mayor profundidad y determinar su utilidad predictiva para la distribución de entidades biológica y su potencial para la evaluación los efectos del cambio climático sobre la distribución de las comunidades biológicas.

AGRADECIMIENTOS

F. Luebert agradece el apoyo financiero del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD). P. Plischoff agradece a CONICYT por su beca de estudios doctorales.

REFERENCIAS

- AMIGO, J. & C. RAMIREZ, 1998.** A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. *Pl. Ecol.*, 136: 9-26.
- ARMESTO, J.J. & J.A. MARTÍNEZ, 1978.** Relations between vegetation structure and slope aspect in the Mediterranean region of Chile. *J. Ecol.*, 66: 881-889.
- ASCHMANN, H., 1984.** A restrictive definition of Mediterranean climates. *Bull. Soc. Bot. France*, 131: 21-30.
- BAGNOULS, F. & H. GAUSSEN, 1953.** Saison sèche et indice xérothermique. Université de Toulouse, Faculté des Sciences, Toulouse.
- BRECKLE, S.W. & H. WALTER, 2002.** *Walter's vegetation of the earth.* Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg - New York.
- DAGET, P., 1977.** Le bioclimat méditerranéen: Caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio*, 34: 1-20.
- DI CASTRI, F. & E.R. HAJEK, 1976.** *Bioclimatología de Chile.* Vicerrectoría Académica de la Universidad Católica de Chile, Santiago.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO), 1985.** *Agroclimatological data for Latin America and the Caribbean.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FOVELL, R.G. & M.C. FOVELL, 1993.** Climate zones of the Conterminous United States defined using cluster analysis. *J. Clim.* 6: 2103-2135.
- FUENZALIDA, H., 1965.** Clima. In: *Geografía económica de Chile*, texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción, Santiago, pp. 99-152.
- GAJARDO, R., 1994.** *La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica.* Editorial Universitaria, Santiago.
- GERSTENGARBE, F.W., P.C. WERNER & K. FRAEDRICH, 1999.** Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: Some problems and their solution. *Theor. Appl. Climatol.*, 64: 143-150.
- GORDON, C., C. COOPER, C.A. SENIOR, H. BANKS, J.M. GREGORY, T.C. JOHNS, J.F.B. MITCHELL & R.A. WOOD, 2000.** The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dynam.*, 16: 147-168.
- GREIMLER, J., P. LÓPEZ S., T.F. STUESSY & T. DIRNBOCK, 2002.** The vegetation of Robinson Crusoe Island (Isla Masatierra), Juan Fernández Archipelago, Chile. *Pac. Sci.*, 53: 263-284.
- HAJEK, E.R. & F. DI CASTRI, 1975.** *Bioclimatografía de Chile.* Dirección de Investigación, Vice-Rectoría Académica, Universidad Católica de Chile, Santiago.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIA), 1989.** *Mapa agroclimático de Chile.* Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007.** *Climate change 2007: Synthesis report.* Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- LUEBERT, F., M. MUÑOZ-SCHICK & A. MOREIRA-MUÑOZ, 2002.** Vegetación y flora de La Campana. In: *Elórtégui, S. y A. Moreira-Muñoz (Eds.), Parque Nacional La Campana. Origen de una Reserva de la Biosfera en Chile Central.* Taller La Era - Fondo de las Américas, Santiago: 36-69.

- LUEBERT, F. & P. PLISCOFF, 2006a.** Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria, Santiago.
- LUEBERT, F. & P. PLISCOFF, 2006b.** Los límites del clima mediterráneo en Chile. Chagual. Revista del Jardín Botánico de Santiago, 4: 64-69.
- MAHLSTEIN, I. & R. KNUTTI, 2010.** Regional Climate Change Patterns Identified by Cluster Analysis. *Clim. Dynam.* 35: 587-600.
- MIDDLETON, N. & D.S.G. THOMAS, 1992.** World atlas of desertification: United Nations Environment Programme. Edward Arnold, London.
- MOREIRA-MUÑOZ, A., 2011.** Plant geography of Chile. *Plant and vegetation* 5. Springer, Dordrecht.
- PLISCOFF, P., 2002.** Climatología de La Campana. In: Elórtogui, S. & A. Moreira-Muñoz (Eds.), Parque Nacional La Campana. Origen de una Reserva de la Biosfera en Chile Central. Taller La Era - Fondo de las Américas, Santiago: 22-26.
- PLISCOFF, P. & F. LUEBERT, 2008.** Ecosistemas terrestres. In: Rovira, J., J. Ugalde y M. Stutzin (Eds.), Biodiversidad de Chile: Patrimonio y desafíos. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago: 74-87.
- PLISCOFF, P. & T. FUENTES-CASTILLO, 2011.** Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *R. Geogr. Norte Grande*, 48:61-79.
- QUINTANILLA, V.G., 1974.** La carta bioclimática de Chile Central. *Rev. Geogr. Valparaíso*, 5: 33-58.
- RAMIREZ, J. & A. JARVIS, 2010.** Downscaling global circulation model outputs: the delta method. Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1. Decision and Policy Analysis. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia.
- RICHARDS, J.A. & X. JIA, 2006.** Remote sensing digital image analysis: an introduction. Springer, Berlin.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., 2008.** Global bioclimatics. Phytosociological Research Center, Madrid.
- ROMERO, H., 1985.** Geografía de Chile: Geografía de los climas. Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- SKOTTSBERG, C., 1920.** Notes on a visit to Easter Island. In: Skottsberg, C. (Ed.) The natural history of Juan Fernández and Easter Island. Almqvist & Wiksells, Uppsala: 3-20.
- THORNTHWAITE, C.W., 1948.** An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38: 55-94.
- UNAL, Y., T. KINDAP & M. KARACA, 2003.** Redefining the climate zones of Turkey using cluster analysis. *Int. J. Climatol.* 23: 1045-1055.
- URIBE, J.M., R. CABRERA, A. DE LA FUENTE & M. PANEQUE, 2012.** Atlas bioclimático de Chile. Universidad de Chile - CORFO - Ministerio de Bienes Nacionales, Santiago.
- WALTER, H. & H. LIETH, 1967.** Klimadiagramm-Weltatlas. G. Fischer, Jena.
- ZSCHEISCHLER, J., M.D. MAHECHA & S. HARMELING, 2012.** Climate classifications: The value of unsupervised clustering. *Procedia Comput. Sci.* 9: 897-906.