

ESTRATIFICACIÓN AMBIENTAL DE CANTABRIA: METODOLOGÍA, RESULTADOS Y APLICACIONES DE INTERÉS PASCÍCOLA

ENVIRONMENTAL STRATIFICATION OF CANTABRIA: METHODOLOGY, RESULTS AND APPLICATIONS
RELATED TO THE PASTURELAND

J. BUSQUÉ, M.G. MAESTRO Y S. JIMÉNEZ

Centro de Investigación y Formación Agrarias. Gobierno de Cantabria. c/ Héroes del 2 de Mayo, 27. E-39600 Muriedas.
juanbusque@cifacantabria.org

RESUMEN

La estratificación ambiental a escalas regional, nacional y continental tiene numerosas aplicaciones en la investigación y en el seguimiento del estado y evolución de los recursos naturales. En este trabajo presentamos la metodología y resultados de una estratificación ambiental realizada de una región entera a partir de variables ambientales definidas a una resolución espacial fina: celdas de 25m de lado. Las 28 variables ambientales elegidas se agruparon en tres tipos: climáticas (24), topográficas (3) y edafológicas (1), realizándose con ellas una ordenación multivariante mediante un análisis factorial mixto. Las tres primeras dimensiones ortogonales de este análisis explicaron un 70% de la varianza total, sirviendo posteriormente para la clasificación de cada celda de 25m de Cantabria en uno de 7 grupos ambientales homogéneos definidos mediante la técnica de agrupamiento de k-medias. Los grupos ambientales así delimitados observan una coherencia ambiental y geográfica notable. Esta coherencia se manifestó, a su vez, en diferencias apreciables en la composición de la vegetación de interés pascícola.

Palabras clave: análisis regional, clima, topografía, edafología, tipificación de pastos.

SUMMARY

Environmental stratification performed at different scales (regional, national or continental) have several applications in research and monitoring of natural resources. In this study we present the methodology and results of an environmental stratification performed of a whole region, using variables defined at a fine spatial resolution (pixel of 25m). The 28 variables chosen were grouped in three types: climatic (24), topographic (3) and edaphic (1), and used in a mixed factorial analysis. The first three orthogonal dimensions of this analysis explained 70% of the total variance, and served as the basis for a classification using k-means clustering. The result was the definition of seven homogeneous strata in terms of geography and environment. These strata showed also contrasted differences in terms of composition in different types of pasture.

Key-words: regional analysis, climate, topography, edaphology, pasture tipification.

INTRODUCCIÓN

La estratificación es la división en clases discretas y homogéneas de variables o conjuntos de variables que se expresan en gradientes continuos. La clasificación del territorio en estratos aporta un marco espacial válido para el análisis de variables ambientales en áreas grandes y heterogéneas (Metzger *et al.*, 2012). Su uso es muy valioso en la planificación de trabajos de investigación y monitoreo ambiental de áreas amplias, pues permite diseñar estratégicamente el muestreo, minimizar los sesgos, reducir costes y extrapolar con rigor estadístico los resultados a todo el territorio. Existen ejemplos notorios de estratificación ambiental en Europa, tanto a nivel nacional (ver. p.ej el caso de Reino Unido: <http://www.countrysidesurvey.org.uk>), como a escala europea (Metzger *et al.*, 2012).

La creciente y cada vez más detallada información ambiental recogida de forma automática (satélites, redes meteorológicas, etc), el desarrollo de herramientas estadísticas más robustas para el análisis de cantidades grandes de información heterogénea, y el paralelo incremento en la capacidad de procesar datos de los ordenadores, hacen cada vez más viables y precisos los ejercicios de estratificación ambiental. Por contra, la inversión en investigación de campo es cada vez más escasa, lo que fomenta la necesidad

de asegurar diseños experimentales que permitan inferir los resultados de las investigaciones al máximo del territorio de interés con el mínimo muestreo posible. Considerando, por ejemplo, la importancia del suelo, la topografía y el clima en la distribución de la vegetación, no parece funcional acometer la confección de mapas de vegetación de zonas amplias completas con trabajo de campo, sino más bien muestrear áreas más pequeñas elegidas aleatoriamente dentro de cada uno de los estratos ambientales que describan adecuadamente el territorio. Si el diseño estadístico es apropiado, los resultados del trabajo proporcionarán estimadores precisos de la vegetación en cada estrato ambiental del territorio.

En este trabajo describimos el proceso de confección y los resultados obtenidos de un ejercicio de estratificación ambiental de Cantabria, en el que se combina la utilización de variables ambientales estimadas a una escala de detalle grande, con unas herramientas estadísticas de ordenación y clasificación no supervisada.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología consistió en la consecución de tres fases: (i) elección de las variables ambientales, (ii) análisis multivariante de ordenación y (iii) clasificación no supervisada de los estratos ambientales.

Variables ambientales

Según su naturaleza, se escogieron tres tipos de variables: climáticas, topográficas y edafológicas. Las variables climáticas principales, temperaturas máxima y mínima medias y precipitaciones, se obtuvieron de Gutiérrez *et al.*, (2010). Estos autores escogieron como periodo climatológico de referencia el de los años 1973-2003, estimando mediante técnicas geoestadísticas datos diarios de temperatura y precipitación a una resolución espacial de 1km. Para bajar de la resolución de 1 km a la resolución de 25m, realizamos una interpolación bilinear, añadiendo posteriormente una corrección por radiación solar según una relación empírica estimada con datos propios de campo. Las variables climatológicas utilizadas fueron los valores mensuales de enero, abril, julio y octubre de las temperaturas máxima y mínima medias, y de la precipitación. A partir de los valores estimados de temperaturas y de la radiación solar extraterrestre se calculó la evapotranspiración potencial media en cada uno de los cuatro meses usando la ecuación de Hargreaves (FAO, 2006). Las últimas variables incluidas en el grupo de variables climáticas fueron las radiaciones solares potenciales para los cuatro meses de referencia, calculadas mediante el modelo “Solar Analyst” de ArcGis (Fu y Rich, 1999), a partir del modelo de elevación del terreno de resolución 25m.

Las variables topográficas escogidas fueron calculadas a partir del modelo de elevación del terreno de resolución de 25m. Para cada celda se obtuvieron valores de altitud, pendiente e índice topográfico de humedad (Moore *et al.*, 1993). La orientación no se utilizó, ya que su interés ambiental queda recogido principalmente en su participación en la radiación solar. Otras variables calculadas, pero finalmente no utilizadas en el análisis por su fuerte sesgo hacia valores muy bajos, fueron los índices de llanura de fondos de valle y crestas (Gallant y Dowling, 2003) y la acumulación de flujo (Moore *et al.*, 2003).

La variable edafológica escogida fue categórica con dos valores según el grado de acidez: suelos ácidos o neutros. Para su delimitación se usó la información cartográfica de pH de los suelos recogida en la Zonificación Agroecológica de Cantabria (www.cartotecaagraria.com). Se utilizó el valor de pH=5,5 para separar los suelos ácidos de los neutros.

Análisis multivariante de ordenación

Se realizó un Análisis Factorial Múltiple (AFM; Abdi *et al.*, 2013) para sintetizar en un número reducido de dimensiones ortogonales la variabilidad ambiental de Cantabria según los grupos de variables descritas en el apartado anterior. El AFM es una extensión del Análisis de Componentes Principales

(ACP) que permite analizar variables estructuradas en grupos diferentes, considerando explícitamente los grupos de pertenencia a la hora de producir los resultados finales. Dada la imposibilidad de realizar el AFM con el total de celdas de 25m de Cantabria (8.413.538), se seleccionó una muestra representativa con un 1% de las celdas totales. La muestra se creó de forma regular, escogiendo una celda de cada 10 (250m), tanto en longitud como en latitud. Se comprobó que los resultados del AFM obtenidos con la muestra elegida fueron casi idénticos a los obtenidos con otras muestras regulares de celdas del mismo tamaño y similar forma de selección. Los valores de cada variable ambiental en la muestra se normalizaron inicialmente. De cara a alimentar la siguiente fase de la metodología, se escogieron las primeras dimensiones ortogonales del AFM cuya suma de valores propios representara más del 70% de la suma total de todos los valores propios. Los valores (puntuaciones) obtenidos de las variables ambientales de partida en cada una de las dimensiones ortogonales elegidas se usaron para predecir la puntuación en dichas dimensiones de las observaciones (celdas) no utilizadas en el análisis.

Clasificación de los estratos ambientales

Con las puntuaciones de las observaciones de la muestra en las primeras dimen-

siones ortogonales elegidas, se realizó una clasificación no supervisada por particiones de las celdas mediante el algoritmo de k-medias (Legendre y Legendre, 2012). Se probaron particiones para formar desde dos a 15 grupos. Se utilizó el índice de Calinski-Harabasz (Legendre y Legendre, 2012) como uno de los criterios para elegir la partición más adecuada. Por último, se volvió a asignar a todas las celdas no incluidas en la muestra uno de los grupos de la partición elegida. Para ello se calculó para cada celda su distancia euclídea en el espacio de sus dimensiones ortogonales respecto a la posición de los centroides de cada uno de los grupos, y asignando cada celda al grupo con la menor distancia. Todos estos análisis se realizaron con el programa estadístico R (www.R-project.org), especialmente con funciones de sus librerías *FactoMineR* y *vegan*. Por último, se utilizó la información generada en el proyecto "Tipificación de pastos de Cantabria" (Fernández et al., 2003) para definir la composición vegetal de los estratos ambientales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tres primeras dimensiones del AFM recogieron el 70,12% de la varianza total. La primera dimensión supuso el 32,13%, la segunda el 19,70%, y la tercera el 18,29% de la varianza total. En la primera dimensión se alcanzaron puntuaciones muy altas en to-

das las temperaturas mensuales mínimas y máximas, excepto en las máximas de julio (figura 1). Por el contrario, se alcanzó la puntuación más baja para la altitud, variable que mostró correlaciones negativas muy altas con todas las temperaturas, excepto con las máximas de julio. En la segunda dimensión del AFM las variables que tuvieron las puntuaciones positivas más altas fueron las evapotranspiraciones y las radiaciones, fuertemente correlacionadas entre sí en cada uno de los cuatro meses de referencia. La pendiente y las precipitaciones de todos los meses fueron las variables con puntuaciones más negativas para esta dimensión. Por últi-

mo, la tercera dimensión del AFM sirvió principalmente para separar los suelos ácidos de los neutros, con escasa respuesta del resto de variables ambientales. El uso del AFM permite asociar pesos equivalentes a grupos de variables que ambientalmente pueden tener importancias similares para la ecología de los seres vivos, como en este caso son el clima, el suelo y la topografía. Esta ventaja, y su capacidad de considerar variables categóricas, hace que su utilización permita mejorar la metodología respecto a la ordenación habitual (ACP) de la mayoría de ejercicios de estratificación ambiental (p.ej. Metzger *et al.*, 2012).

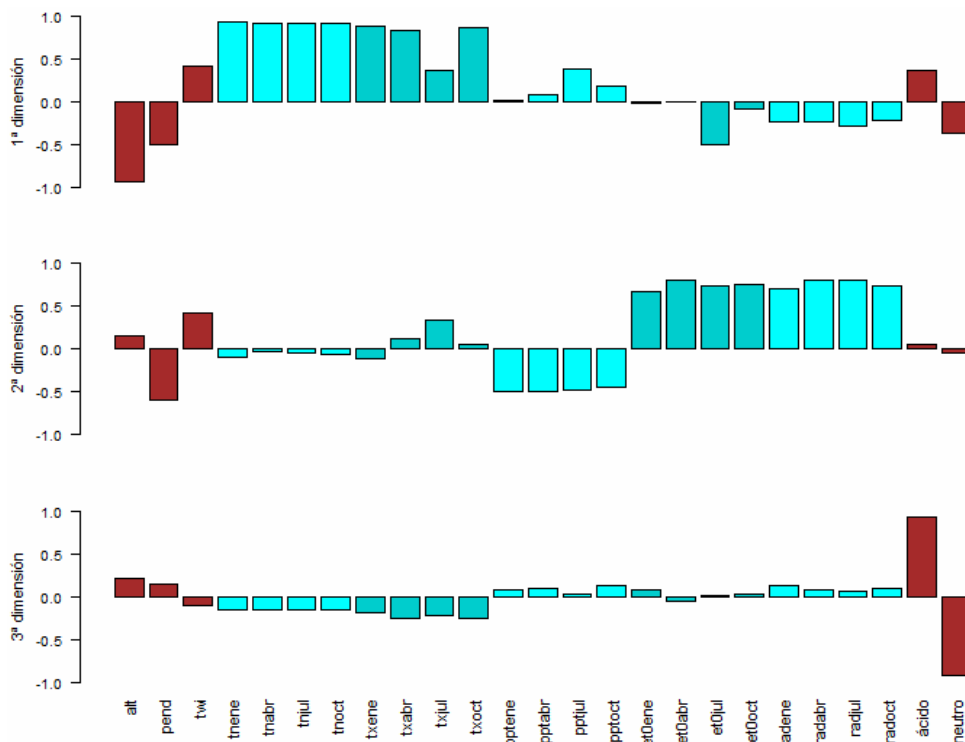


Figura 1. Puntuación de las variables ambientales de partida en las tres primeras dimensiones del análisis factorial múltiple. alt= altitud; pend: pendiente; twi: índice topográfico de humedad; tn: temperatura mínima media; tx: temperatura máxima media; ppt: precipitación; et0: evapotranspiración; rad: radiación solar potencial; ácido y neutro se refieren al pH de los suelos. ene: enero; abr: abril; jul: julio; oct: octubre

Respecto a la estratificación, el índice de Calinski-Harabasz señaló como más adecuadas las particiones generando de siete a 15 grupos. De estas, la partición que produjo siete estratos ambientales mostró valores de este índice mucho más altos que particiones más pequeñas, y poco más bajos que las particiones de 10 a 15 grupos. La mejor interpretación cartográfica de la clasificación en siete grupos fue determinante para su elección. El valor de los centroides de cada uno de los siete estratos en las tres primeras dimensiones del AFM mostró una diferenciación clara en este espacio tridimensional (tabla 1).

El estrato 1 corresponde a los terrenos más difíciles de la región: zonas calizas, con pendientes fuertes y evapotranspiraciones bajas (figura 2). El estrato 2 comprende también zonas calizas, pero con menores

pendientes y mayores evapotranspiraciones que el estrato 1. El estrato 3 abarca las zonas más altas y frías de la región, con relativa indiferencia respecto al sustrato. El estrato 4 se sitúa en terrenos altos y fríos, de baja pendiente y predominantemente ácidos. El estrato 5 se encuentra en zonas bajas con temperaturas altas y sobre terrenos ácidos. El estrato 6 ocupa zonas pendientes y ácidas de los tramos medios y altos de los valles cantábricos. Por último, el estrato 7 se distribuye en las zonas más termófilas, con predominancia también de suelos neutros.

Desde el punto de vista de la vegetación de interés pascícola (tabla 1), se pueden distinguir inicialmente los estratos con predominio de pastos leñosos (estratos 1, 2, 3, 4 y 6), que corresponden sobre todo a la media y alta montaña, de los mayoritariamente herbáceos (estratos 5 y 7), localizados

Tabla 1. Valores de las dimensiones del Análisis Factorial Múltiple y porcentaje de superficie ocupada por distintos tipos de vegetación en los estratos ambientales clasificados en Cantabria

	Estratos ambientales						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Superficie (ha)	33.790	40.924	44.799	110.838	116.345	100.456	78.694
(% de Cantabria)	(6,4%)	(7,8%)	(8,5%)	(21,1%)	(22,1%)	(19,1%)	(15,0%)
Dimensión 1	0,40	-0,32	-2,49	-0,89	0,90	-0,37	1,78
Dimensión 2	-1,25	1,00	-0,24	0,92	0,02	-1,11	0,25
Dimensión 3	1,52	1,61	0,44	-0,49	-0,94	-0,54	1,05
Pasto con arbolado (denso y ralo)	25%	18%	30%	30%	29%	37%	14%
Pasto arbustivo	42%	42%	44%	38%	9%	28%	12%
Pastizal	5%	11%	3%	9%	3%	9%	1%
Pasto de puerto	0%	1%	12%	1%	0%	0%	0%
Prado + Pastos de origen agrícola	25%	25%	5%	20%	53%	24%	63%
Otros	3%	3%	6%	2%	6%	2%	10%

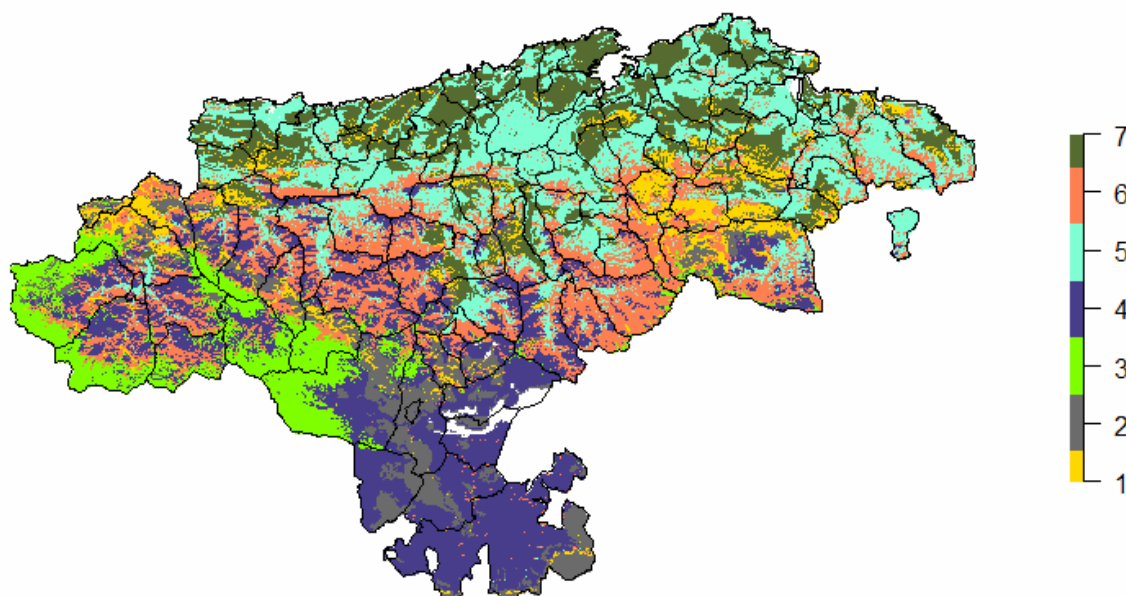


Figura 2. Distribución geográfica de los siete estratos ambientales clasificados en Cantabria.

en el litoral y fondos de valle. Entre los primeros, el estrato 3 se diferencia por su menor proporción de prados y mayor de pastos de puerto, de acuerdo a su clima y altitud. Por otro lado, el estrato 6 destaca por la mayor presencia de terreno arbolado y la menor de arbustivo; en estas zonas ácidas y empinadas son abundantes los hayedos en el occidente, y los pastizales de *Molinia caerulea* frecuentemente quemados en el oriente. Entre los estratos más empradizados (5 y 7), el 5 es más forestal, con abundancia de cultivos de eucalipto, y el 7, el de mayor potencial agrícola, tiene la mayor proporción de superficie ocupada en usos no agrarios.

CONCLUSIONES

La estratificación ambiental de Cantabria define con claridad siete tipos de territorio homogéneos según su clima, topografía y sustrato, pero también según su composición en tipos de vegetación de interés pascícola. Esta estratificación tiene gran interés en el diseño y planificación de estudios sobre el estado y evolución de estos recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

El Grupo de Meteorología de Santander (Instituto de Física Aplicada-Universidad de Cantabria) nos facilitó los datos climáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI H., WILLIAMS L.J. Y VALENTIN D. (2013) Multiple factor analysis: principal component analysis for multi-table and multiblock data sets. *WIREs Computational Statistics* 5: 149-179.

FAO (2006) *Evapotranspiración del cultivo*. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56.

FERNÁNDEZ B. et al. (2003) Los pastos en Cantabria y su aprovechamiento. 5 vols. CIFA-Gobierno de Cantabria. www.cifacantabria.org.

FU P. Y RICH P.M. (1999) Design and implementation of the Solar Analyst: an Arc-View extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Actas de la 19ª Conferencia Anual de Usuarios ESRI*. San Diego, EEUU.

GALLANT J.C. Y DOWLING T.I. (2003) A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research* 39: 1347-1360.

GUTIÉRREZ J.M. et al. (2010) *Escenarios regionales probabilísticos de cambio climático en Cantabria: termopluviometría*. Gobierno de Cantabria – Universidad de Cantabria. Santander, 108 p. <http://www.meteo.unican.es/projects/escenariosCantabria>

LEGENDRE P. Y LEGENDRE L. (2012) *Numerical Ecology*. Third English Edition. Elsevier. Amsterdam. 990p.

METZGER M., SHKARUBA A.D., BUNCE R.G.H. Y JONGMAN R.H.G. (2012) *Descriptions of the European environmental zones and strata*. Informe de Alterra 2281. Wageningen. 152p.

MOORE I.D., GESSLER P.E., NIELSEN G.A. Y PETERSON G.A. (1993) Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal* 57: 443-452.