

Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia

Esteban G. Jobbágy, José M. Paruelo¹ y Rolando J.C. León

IFEVA, Departamento de Ecología, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417), Buenos Aires, Argentina.

¹ Dirección actual: Department of Range Science, Colorado State University. Fort Collins, CO 80523, USA

Resumen. Se elaboraron modelos de regresión para el sector NO de Chubut (16000 km²) que permiten estimar la precipitación media anual y estacional y el coeficiente de variación interanual a partir de la distancia a la cordillera de los Andes. Hacia el este de la cordillera la precipitación media anual y estacional decreció exponencialmente mientras que el coeficiente de variación de la precipitación anual aumentó exponencialmente. No se observaron cambios importantes en la distribución intranual de la precipitación a lo largo del gradiente descripto.

Abstract. We estimated mean annual and seasonal precipitation from the distance to the Andes using regression analysis for an area of 16000 km² in Northwest Chubut (Argentina). Mean annual and seasonal precipitation decreased exponentially eastward of the Andes, whereas the coefficient of variation of annual precipitation increased exponentially. No significant changes in the seasonal distribution of precipitation were detected along this gradient.

Introducción

Un problema frecuente en áreas donde la población es escasa, como en la Patagonia, es la baja densidad de estaciones meteorológicas y la falta de continuidad en los registros. Este problema genera la necesidad de recurrir a estimaciones de las variables climáticas más relevantes.

Como en la mayoría de las regiones áridas y semiáridas ubicadas en latitudes intermedias a altas, el origen principal de las precipitaciones en la Patagonia es de tipo frontal (Bell 1981). Fuertes vientos del oeste caracterizan el clima de la región. Estas masas de aire provenientes del Océano Pacífico atraviesan la cordillera de los Andes e ingresan en las mesetas orientales descargando su humedad a lo largo de este trayecto (Walter y Box 1983). El fenómeno climático descripto determina la existencia de un acentuado gradiente pluviométrico O-E en la franja oriental de la cordillera y en el sector occidental de las sierras y mesetas con las que limita hacia el este.

En Chubut se han elaborado mapas de isohietas a partir de los registros de más de 100 sitios que abarcan casi toda la provincia (Barros et al. 1979). La escala de los mapas generados es 1:1.500.000 y el intervalo entre isohietas es de 100 mm hasta la isohieta de 600 mm y de 200 mm o más para las isohietas mayores a 600 mm. Esto determina que en sectores cercanos a la cordillera resulte difícil obtener con precisión los valores de precipitación media debido al acentuado gradiente pluviométrico.

En este trabajo se presentan funciones que permiten estimar, en el sector NO de Chubut, el valor de precipitación media anual, su variabilidad y los valores medios para las cuatro estaciones del año a partir de la distancia en sentido O-E al cordón más oriental de la cordillera de los Andes. Se analizan a su vez las variaciones en la distribución estacional de las precipitaciones a lo largo del gradiente geográfico descripto.

Tabla 1. Sitios utilizados en este trabajo. Se indican las coordenadas geográficas (latitud: Lat y longitud: Lon), la altitud (Alt), y la cantidad de años de registro (Años). El primer grupo de sitios fue utilizado para generar el modelo, el segundo grupo se utilizó solamente en su evaluación.

Table 1. Sites used in this work. Site geographic coordinates (latitude: Lat and longitude: Lon), elevation (Alt) and number of recorded years (Años) are indicated. The first group of sites was used to build the models, the second group was only used to test them.

Sitio	Lat	Lon	Alt	Años
<i>Grupo 1</i>				
01 LA SUNICA	43.33	70.98	900	36
02 LA MIMOSA	43.45	70.83	600	36
03 FOFOCAHUEL	42.40	70.53	520	34
04 LELEQUE	42.41	71.05	700	34
05 LAGO ROSARIO	43.24	71.35	650	33
06 QUICHAURA	43.55	70.45	900	32
07 ESQUEL	42.92	71.32	566	30
08 CHOLILA	42.49	71.53	600	30
09 EL PRINCIPIO	42.96	71.40	750	30
10 GARZON	43.13	71.58	320	29
11 LEPA	42.61	71.05	770	26
12 MONTOSO	42.75	71.00	850	26
13 NAHUEL PAN	43.01	71.23	900	25
<i>Grupo 2</i>				
14 MAITEN 1	42.31	71.33	680	23
15 GUALJAINA1	42.70	70.50	510	23
16 RIO FRIO	43.33	71.50	573	22
17 MAITEN 2	42.03	71.13	647	22
18 GUALJAINA2	42.70	70.53	500	20
19 CORINTO	43.06	71.30	350	17
20 LANGUINEO	43.28	70.46	875	13
21 A. BLANCHE	43.53	70.78	650	13
22 A. PESCADO	43.05	70.80	590	12
23 NORQUINCO	42.01	70.85	750	12
24 CUSHAMEN	42.13	70.75	750	12

Materiales y Métodos

El área estudiada corresponde a una faja superpuesta a la cordillera a lo largo de 180 km en el N de Chubut y tiene un ancho aproximado de 90 km (Fig.1). El relieve es en general accidentado y heterogéneo, ya que incluye sectores montañosos, valles fluviales, valles glaciares, colinas, mesetas y sierras (Beeskow et al. 1987). La vegetación comprende áreas de bosques, praderas, estepas gramíneas y estepas arbustivas (Soriano 1956, Soriano y Paruelo 1990, Jobbágy 1993).

Se utilizaron registros de 24 sitios, en su mayoría pertenecientes a establecimientos ganaderos particulares (Fig.1, Tabla 1). En todos los sitios los registros superan los 12 años. La densidad espacial de registros pluviométricos en el área elegida es la más alta disponible para sectores de ubicación geográfica similar en la Patagonia.

A partir de sumas mensuales se obtuvo el valor medio de la suma anual de precipitación (PPAVGa) y su coeficiente de variación (PPCV), se calcularon los valores medios estacionales considerando como verano (PPAVGv) al trimestre diciembre-enero-febrero, como otoño (PPAVGo) al trimestre marzo-abril-mayo, como invierno (PPAVGi) al trimestre junio-julio-agosto y como primavera (PPAVGp) al trimestre septiembre-octubre-noviembre.

Con el fin de estimar la cantidad mínima de años que se requerirían para incluir a un sitio en

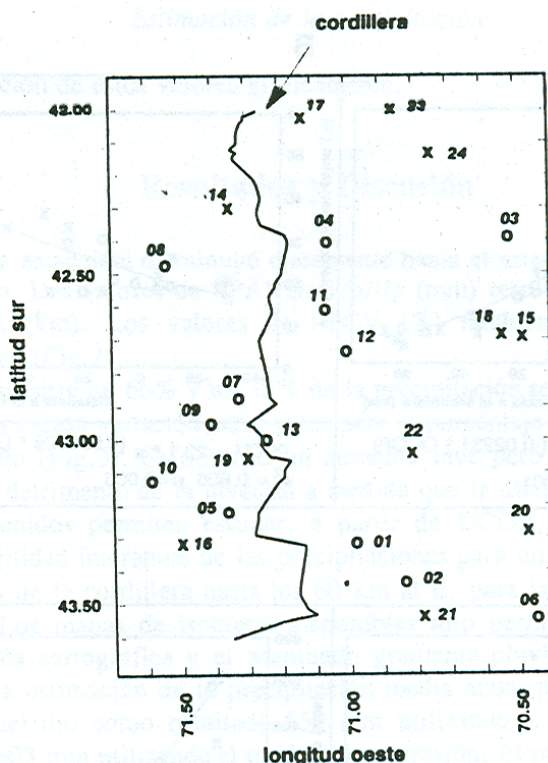


Figura 1. Esquema del área estudiada. Se indica con una línea el cordón más oriental de la cordillera de los Andes a partir del cual se calcularon las distancias (de norte a sur: cadenas montañosas de Cholila, Leleque, Esquel, Cerro Nahuel Pan, Sierra Colorada y Cordón Kakel). Los círculos representan la ubicación de los sitios con registros para más de 24 años y las cruces la de los sitios con registros inferiores a este período. Los números de los sitios son los mismos que figuran en la tabla 1.

Figure 1. Scheme of the study area. The solid line shows the eastern Andean range, from where the distances were calculated (from north to south: mountain ranges of Cholila, Leleque, Esquel, Nahuel Pan peak, Sierra Colorada and Kakel). The circles indicate sites with data records longer than 24 years and the crosses indicate sites with shorter data records. Site numbers are as in table 1.

el análisis, se calculó la precipitación media con subconjuntos crecientes de años tomados al azar de la serie más variable (PPCV=50%). Se analizaron los desvíos de estos valores con respecto al promedio del total de la serie (30 años). Con conjuntos superiores a 24 años los desvíos resultaron menores al 10% de la media para el total de la serie.

Utilizando hojas topográficas 1:100000 (IGM: 4172-23/29/35 y 4372-05/11/17), se trazó la línea geográfica que une las cumbres más altas sobre el cordón más oriental de la cordillera (Volkheimer 1983, figura 1). Para cada sitio se calculó la distancia en sentido O-E a esta línea (DCOR). A los sitios ubicados al O del cordón se les asignó valores negativos.

La relación entre la distancia al cordón montañoso y las variables pluviométricas se determinó ajustando modelos de regresión simple. En este análisis se incluyeron solamente los datos de los 13 sitios disponibles cuyos registros superan los 24 años. De esta manera se garantizó, aun para las series más variables, estimaciones del valor de PPAVGa con un desvío menor al 10%.

Considerando que la distancia a la cordillera es una variable que puede resultar difícil de obtener si no se cuenta con la cartografía adecuada, se evaluó como variable de reemplazo a la distancia a un meridiano determinado. Se calculó el coeficiente de regresión entre los valores predichos y los observados para el conjunto de 24 estaciones utilizando los modelos de regresión generados con DCOR con esta variable como independiente y reemplazandola por la distancia al meridiano promedio de la cordillera. Esta última variable resulta fácil de calcular: se obtiene la distancia del sitio al meridiano de 72.00 O y se restan 64 km.

Para cada sitio se calculó el porcentaje de la precipitación ocurrida en las distintas estaciones del

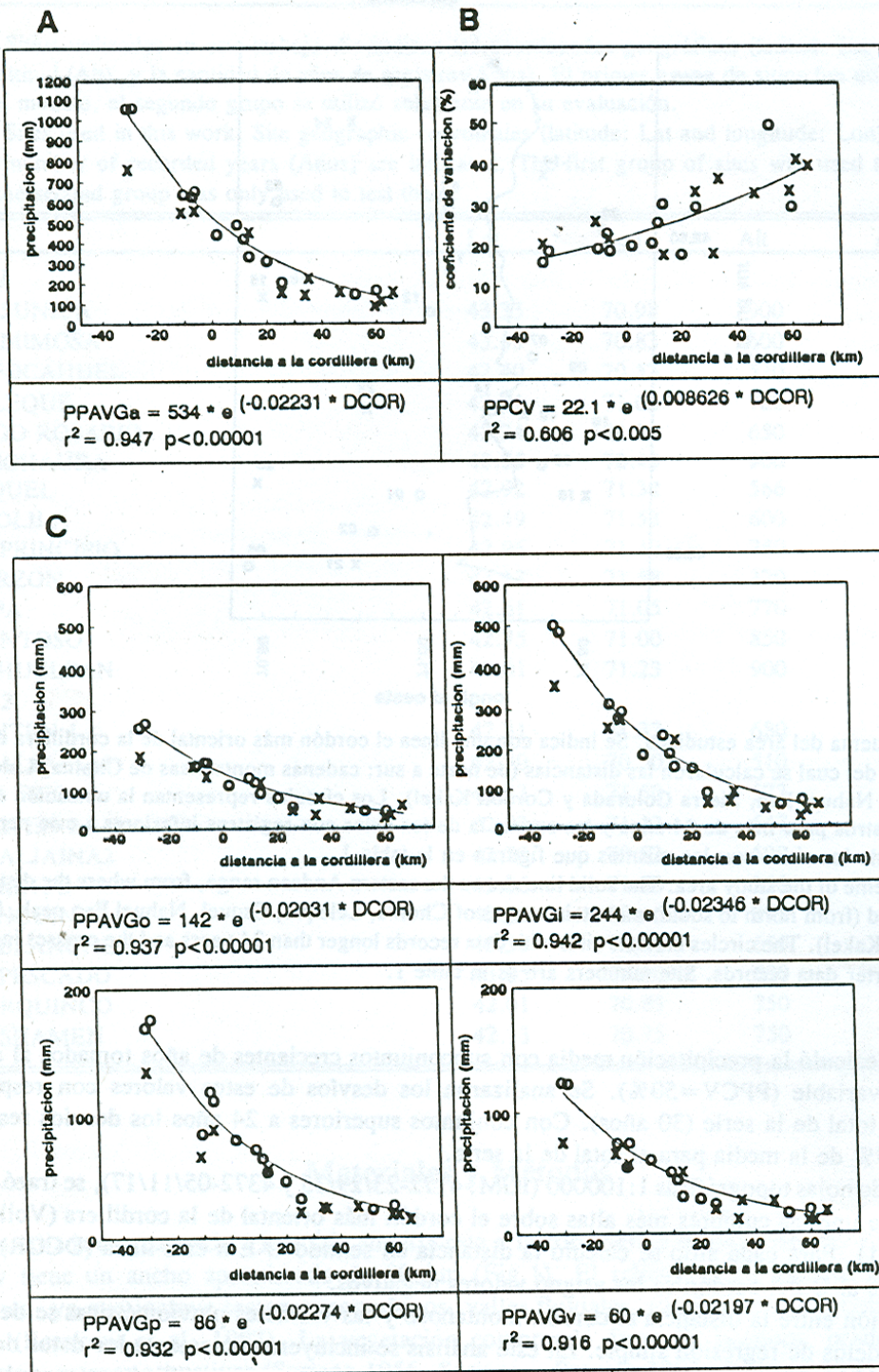


Figura 2. (a) Precipitación media anual (PPAVGa), (b) coeficiente de variación de la precipitación anual (PPCV) y (c) precipitación media para cada estación (PPAVGo/i/p/v), en función de la distancia a la cordillera. Las curvas indican los modelos ajustados por regresión de mínimos cuadrados a partir de los datos de sitios con series de más de 24 años (círculos). Se indica la posición en el gráfico de los sitios descartados en la generación del modelo (cruces). Debajo de cada gráfico se presentan las ecuaciones de los modelos ajustados, su coeficiente de regresión (r^2) y su nivel de significancia.

Figure 2. (a) Mean annual precipitation (PPAVGa), (b) coefficient of variation of annual precipitation (PPCV) and (c) mean seasonal precipitation (PPAVGo/i/p/v) in relation to the distance to the Andean range. The curves show the least square regression models, which were adjusted using the sites having data for more than 24 years (circles). The sites having data for shorter periods are also plotted (crosses). The equations, the regression coefficient (r^2) and the significance level of the adjusted models are shown under each plot.

año. Se analizó la variación de estos valores gráficamente.

Resultados y Discusión

La precipitación anual y estacional disminuyó claramente hacia el este, mientras que su variabilidad aumentó en este sentido. Los valores de PPAVGa/v/o/i/p (mm) resultaron asociados exponencial e inversamente a DCOR (km). Los valores de PPCV (%) también se ajustaron a un modelo exponencial, pero directo (Fig.2).

En todos los sitios, entre un 66% y un 78% de la precipitación se registró en el período otoño-invernal. Se detectó una escasa variación entre sitios para el porcentaje de la precipitación que ocurre en cada estación del año (Fig.3). Se observó un aumento leve pero significativo ($p < 0.01$) de la precipitación otoñal en detrimento de la invernal a medida que la distancia a la cordillera es mayor.

Los modelos obtenidos permiten estimar, a partir de DCOR, los valores medios anual y estacionales y la variabilidad interanual de las precipitaciones para un área que va desde los 35 km al O del último cordón de la cordillera hasta los 60 km al E, para la región NO de Chubut (entre 42.00 S y 43.60 S). Los mapas de isohietas disponibles sólo permiten interpolaciones de escasa precisión dada su escala cartográfica y el acentuado gradiente pluviométrico que caracteriza a la región. Por ejemplo, la estimación de la precipitación media anual para la posición de la estación meteorológica de Esquel dio como resultado 550 mm utilizando el mapa de isohietas disponible (Barros et al. 1979) y 603 mm utilizando el modelo de regresión. El promedio para 30 años de datos de esta estación es de 635 mm. En el caso del mapa de isohietas es esperable que las áreas de mayor error sean aquellas más distantes a los sitios con datos reales. Considerando que la estación del ejemplo fue utilizada para elaborar el mapa, puede esperarse mayor error en sectores más alejados a las estaciones meteorológicas. Por otra parte los mapas de isohietas, a diferencia de los modelos de regresión, no brindan una medida del ajuste a los datos reales o del error de la información. Como ejemplo, el coeficiente de regresión del modelo de PPAVGa indica que más de un 94% de la variación espacial de la precipitación es explicada por la distancia a la cordillera. En el caso del ejemplo de la estación de Esquel se calculó el intervalo de confianza con $p = 95\%$ para el valor estimado por el modelo obteniéndose un rango de 569 mm a 637 mm.

En la proximidad de la cordillera, la precipitación es mayor y su variabilidad es menor. Esto coincide con la relación inversa observada en otras regiones áridas del mundo entre el nivel total de precipitación y su variabilidad (Noy Meir 1973, Bell 1981). Por otra parte, el gradiente de precipitación descripto implica cambios proporcionales en la precipitación estacional, determinando escasa variación en la distribución intranual de la precipitación.

Un aspecto que debe ser tenido en cuenta al utilizar estos modelos es que han sido generados con datos de sitios ubicados en áreas de baja altura relativa, como son en general los cascos de estancias o puestos. Los sitios disponibles no representan a los sectores más altos del área estudiada (altura mínima: 320 m, altura máxima: 900 m, altura promedio de los 24 sitios 663 m) (Tabla 2). Es probable que en el área existan gradientes altitudinales de precipitación. En general, en latitudes intermedias la precipitación aumenta con la altitud (Barry 1981). Se han descripto gradientes de este tipo en distintos ambientes. Peck y Brown (1962) encontraron en Utah, en una región semiárida templada en donde el régimen de precipitaciones es similar al de la Patagonia, gradientes que variaban entre 33 y 42 mm cada 100 m de desnivel. Barros et al. (1983) hallaron un relación positiva y significativa entre la altitud y la precipitación en el oeste de Río Negro y Neuquén. Las estimaciones de los modelos propuestos son válidas en el rango de altitudes de los sitios utilizados. En sectores más altos es probable que se subestimen los valores medios de precipitación.

El uso de la distancia al meridiano promedio de la cordillera no redujo en forma sustancial el ajuste entre los valores esperados y los predichos (Tabla 3). La obtención de esta variable es más sencilla que la de DCOR y permite utilizar los modelos sin modificar sus parámetros. Las estimaciones basadas en esta variable alternativa muestran un error levemente superior al que se alcanza utilizando DCOR.

Los resultados de este trabajo permiten aplicar sobre el terreno, a partir de ecuaciones simples,

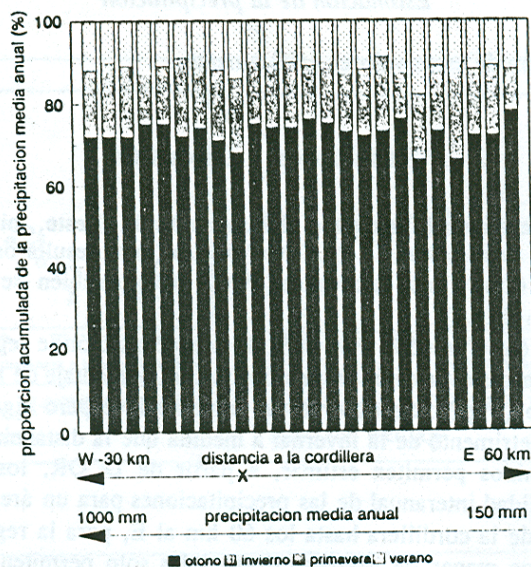


Figura 3. Distribución estacional de la precipitación. Se ordenaron los sitios según su distancia a la cordillera. Los valores se expresan como porcentajes de la precipitación media anual. Considerando el promedio de todos los sitios, un 46% de la precipitación ocurre en invierno, un 27% en otoño, un 16% en primavera y un 11% en verano.

Figure 3. Seasonal distribution of precipitation. The sites were arranged according to their distance to the Andean range. The values were expressed as a percentage of the annual mean precipitation. Mean distribution of precipitation for all sites: 46% in winter, 27% in autumn, 16% in spring, and 11% in summer.

Tabla 2. Superficie a distintos intervalos de altitud dentro del área de estudio y cantidad de sitios ubicados en cada rango altitudinal.

Table 2. Area corresponding to different ranges of altitude in the study area and number of sites located in each range.

Altitud (msnm)	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Número de sitios
< 500	500	3	3
500-1000	11000	69	21
1000-1500	3700	23	-
> 1500	800	5	-

Tabla 3. Coeficientes de regresión entre los valores predichos por los modelos y los observados para los 24 sitios disponibles. Se utilizaron como variables independientes alternativas la distancia a la cordillera (DCOR) y la distancia al meridiano promedio de la cordillera (DMED). Esta variable equivale a la distancia al meridiano de 72.00 O menos 64 km). En ambos casos se utilizaron los mismos parámetros de regresión.

Table 3. Regression coefficients between values predicted by the models and observed values for 24 available sites. Distance to the andean range (DCOR) and distance to the mean meridian of this range (DMED) were used as alterantive independent variables. DMED is equal to the distance to the 72.00 O meridian minus 64 km). In both cases the same regression parameters were used.

Modelo	con DCOR	con DMED
PPAVGa	0.943	0.925
PPCV	0.784	0.769
PPAVGv	0.903	0.879
PPAVGo	0.916	0.902
PPAVGi	0.944	0.925
PPAVGp	0.921	0.909

modelos ecológicos basados en la precipitación. Algunos de estos modelos permiten estimar aspectos del funcionamiento y el manejo de los ecosistemas, tales como la dinámica del agua (Paruelo y Sala 1995), la variación espacial de la productividad primaria neta (Sala et al. 1988) y la carga de herbívoros (Oesterheld et al. 1992).

Bibliografía

- Barros, V.R., B.V. Scian y H.F. Mattio. 1979. Campos de precipitación de la provincia de Chubut (período 1931-1960). *Geoacta* 10:175-192.
- Barros, V.R., V.H. Cordon, C.L. Moyano, R.J Méndez, J.C. Forquera y O. Pizzio. 1983. Cartas de precipitación de la zona oeste de las provincias de Río Negro y Neuquén. CONICET-Buenos Aires. 28 pp.
- Barry, R.G. 1981. *Mountain Weather and Climate*. Methuen, London. 320 pp.
- Beeskow, A.M., H.F. Del Valle y C.M. Rostagno. 1987. Los Sistemas Fisiográficos de la Región Árida y Semiárida de Chubut. SECyT, Bariloche. 173 pp.
- Bell, H.D. 1981. Precipitation. En D.W. Goodall y R.A. Perry (eds.). *Arid land ecosystems*, Vol 2, pp 373-393. Cambridge University Press. Cambridge.
- Jobbágy, E.G. 1993. Relaciones vegetación-ambiente a la escala de paisaje en la estepa del Distrito Occidental de la Patagonia extrandina. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Noy Meir, I. 1973. Desert Ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:25-52
- Oesterheld, M., O.E. Sala y S.J. McNaughton. 1992. Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at a regional scale. *Nature* 356:234-235.
- Paruelo J.M y O.E. Sala. 1995. Water losses in the Patagonian steppe: A modelling approach. *Ecology (en prensa)*.
- Peck E.L. y M.J. Brown. 1962. An approach to the development of isohyetal maps in mountainous areas. *J. Geophys. Res.* 67:681-694
- Sala, O.E., W.J. Parton, L.A. Joyce y W.K. Lauenroth. 1988. Primary Production of the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 69:40-45.
- Soriano, A. 1956. Los distritos florísticos de la provincia Patagonica. *Rev. Inv. Agr.* 10, 323-347.
- Soriano, A. y J.M. Paruelo. 1990. El manejo de campos de pastoreo en Patagonia: Aplicación de principios ecológicos. *Ciencia hoy* 2:44-53.
- Volkheimer, W. 1983. Geology of extra-Andean Patagonia. In *Deserts and Semideserts of Patagonia*. West, N.E. (ed.). *Temperate Deserts and Semideserts*, pp. 440-453. Elsevier. Amsterdam.
- Walter, H. y E.O. Box. 1983. Climate of Patagonia. In *Deserts and Semideserts of Patagonia*. West, N.E. (ed.). *Temperate Deserts and Semideserts*, pp. 432-435. Elsevier. Amsterdam.

Recibido: 27/1/94

Aceptado: 5/2/95