
UN MÉTODO DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL PARA EL ESTABLECIMIENTO DE ESPECIES FORRAJERAS CON USO PASTORIL EN CHILE CENTRAL

Roberto Garfías Salinas, Miguel Castillo Soto, Camilo Allende Manosalva y Francisca Ruiz Gozalvo

RESUMEN

Se evaluaron cinco especies forrajeras tradicionalmente utilizadas en Chile Central como alimento para ganado bovino, ovino, caprino y equino, cuyo establecimiento no se realiza considerando los requerimientos físico-ambientales. Este estudio aporta antecedentes sobre las capacidades de establecimiento potencial para un mayor y mejor abastecimiento de forraje para ganado, en zona de secano. Las especies *Trifolium subterraneum L.*, *T. michelianum Savi*, *Phalaris aquatica L.*, *Medicago polymorpha L.* y *Avena sativa L.* fueron elegidas por su éxito comprobado en establecimiento de cultivos anuales, baja demanda de riego, fácil manejo, bajos costos de producción, disponibilidad de semillas y palatabilidad para las principales razas ganaderas locales. Considerando los requerimientos de crecimiento, suelo, agua y otros, se definió un modelo multicriterio de establecimiento potencial para evaluar aquellas zonas

potencialmente prioritarias, no competidoras con otros usos del suelo, generar un recurso natural complementario para familias productoras y permitir una economía de subsistencia en la región. Para cada especie se creó un modelo de capacidad de acogida, segmentando los resultados en categorías de prioridad territorial. De acuerdo a las variables biofísicas de establecimiento, *P. Aquatica L.* es la especie forrajera de mayor superficie potencial disponible, con 57.793ha (27,6% del área en estudio). En contraparte, *T. Michelianum Savi* presenta superficies con categorías de establecimiento media y baja. Una propuesta de uso de suelo indicó que la especie más recomendable para establecer es *A. sativa L.* con 21.512ha (10,3% del total). Estos resultados dan un marco de referencia a la toma de decisiones a nivel predial sobre alternativas de aprovechamiento de tierras con aptitud forrajera.

Introducción

El sector pecuario es uno de los aportes mayores para el crecimiento socioeconómico y productivo de Chile. Sin embargo, es uno de los sectores productivos más vulnerables a la variación de los cultivos anuales, la escasez de precipitaciones o agua para riego, como también al efecto de los incendios forestales, cambios en el uso del suelo, y a una escala mayor, el cambio climático (Agrimed, 2008). La producción de forraje en la Zona Central del país es de gran importancia para la economía familiar; es la fuente de alimento que proporciona los

nutrientes necesarios más económicos para la alimentación animal. Por eso, es importante tener disponibilidad adecuada de este recurso con las especies forrajeras mejores según las condiciones climáticas, y dada la existencia de antecedentes empíricos de los campesinos que utilizan combinaciones de especies como alimento para el ganado. Para la elección del forraje más adecuado es necesario considerar factores tales como suelo, clima, objetivos de producción, época de siembra y estacionalidad de la cosecha. Esto se debe a los distintos grados de adaptación de las especies y a las diferentes condiciones am-

bientales en el país (Romero, 1996). En el caso de Chile Central se trata de especies que se adaptan adecuadamente a las oscilaciones propias de clima mediterráneo, exposición al sol, resistencia al crecimiento en suelos compactos, pisoteo, ramoneo y frecuentemente escasez hídrica.

La pradera produce el principal aporte de forraje, en forma directa a través del pastoreo o también en algunos casos en forma indirecta mediante corte para soiling, heno o ensilaje (Azócar, 2006). Además de tener implicancia en la economía familiar, mejora la sustentabilidad de los recursos naturales

(Martínez *et al.*, 2008). Al estar en sistemas silvopastoriles combina simultáneamente la producción ganadera en base a praderas con la producción de árboles, para uso forestal, frutícola o productos forestales no madereros. Así, contribuye a mitigar la erosión en suelos e incrementar los nutrientes y el agua en el ecosistema (Ruiz, 2011).

En la necesidad de establecer pradera y así aportar a los ecosistemas, es necesario conocer los requerimientos ambientales de las especies forrajeras (Chaipong y Wachrinrat, 2014). Para esto existen métodos de evaluación multicriterio (EMC), que fun-

PALABRAS CLAVE / *Avena sativa L.* / Especies Forrajeras / Evaluación Multicriterio / *Medicago polymorpha L.* / *Phalaris aquatica L.* / Secano Interior / SIG / *Trifolium michelianum Savi* / *Trifolium subterraneum L.* /

Recibido: 19/02/2018. Modificado: 11/01/2019. Aceptado: 14/01/2019.

Roberto Garfías Salinas (Autor de correspondencia). Ingeniero Forestal, Universidad de Chile (UCHile). M.Sc. en Agroforestería, Universidad Autónoma Chapingo, México. Profesor, UChile. Dirección: Departamento de Gestión Forestal y su

Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, UChile. Avenida Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago. e-mail: rgarfias@uchile.cl
Miguel Castillo Soto. Ingeniero Forestal y Magister en Geo-

grafía, UChile. Doctor en Recursos Naturales y Sostenibilidad, Universidad de Córdoba, España.
Camilo Allende Manosalva. Ingeniero Forestal, UChile. Consultor en el área forestal.

Francisca Ruiz Gozalvo. Ingeniera Forestal, UChile. Ingeniera de Proyectos y Consultora en el área forestal.

A METHOD OF ENVIRONMENTAL ZONING FOR THE ESTABLISHMENT OF FORAGE SPECIES WITH PASTORIL USE, IN CENTRAL CHILE

Roberto Garfías Salinas, Miguel Castillo Soto, Camilo Allende Manosalva and Francisca Ruiz Gozalvo

SUMMARY

We evaluated five fodder species traditionally used in Central Chile as food for cattle, sheep, horses and goats, which are currently cultivated without consideration to their physical and environmental requirements. This study provides information on potential establishment capabilities for greater and better supply of livestock fodder in dry areas. The species *Trifolium subterraneum* L, *T. michelianum* Savi, *Phalaris aquatica* L, *Medicago polymorpha* L y *Avena sativa* L were selected for their proven success in establishing annual crops, low irrigation demands, low production costs, seed availability, easy management, and palatability for the main livestock breeds of these dry region. A multivariable model for the potential growth of each species was defined on the bases of their growth requirements, to evaluate areas of potential

priority that have no other competing soil uses, in order to generate a complementary natural resource for farming family, promoting the continuity of subsistence economy in the central region of Chile. For each species we created a crop capacity model, dividing the results in categories of territorial priority. According to the biophysical variables, *P. Aquatica* L. is the fodder species with the largest potential available surface, with 57,793ha (27.6% of the area under study). In contrast, *T. Michelianum* presented only surfaces for low and medium establishment. A soil use scenario indicated *A. sativa* as the most recommended fodder crop with 21,512ha (10.3% of the study area). These results provide a framework for decision making at farm scale, offering alternatives for the use of those lands with foraging aptitudes.

UM MÉTODO DE ZONIFICAÇÃO AMBIENTAL PARA O ESTABELECIMENTO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA USO PASTORAL NO CHILE CENTRAL

Roberto Garfías Salinas, Miguel Castillo Soto, Camilo Allende Manosalva e Francisca Ruiz Gozalvo

RESUMO

Avaliaram-se cinco espécies forrageiras tradicionalmente utilizadas no Chile Central como alimento para gado bovino, ovino, caprino e equino, cujo estabelecimento não se realiza considerando os requerimentos físico-ambientais. Este estudo fornece antecedentes sobre as capacidades de estabelecimento potencial para maior e melhor abastecimento de forragem para gado, em áreas de sequeiro. As espécies *Trifolium subterraneum* L, *T. michelianum* Savi, *Phalaris aquatica* L, *Medicago polymorpha* L e *Avena sativa* L foram eleitas por seu comprovado sucesso em estabelecimento de cultivos anuais, baixa demanda de irrigação, fácil manejo, baixos custos de produção, disponibilidade de sementes e palatabilidade para as principais raças locais de gado. Considerando os requerimentos de crescimento, solo, água e outros, foi definido um modelo multicritério de estabelecimento potencial para avaliar aquelas áreas

potencialmente prioritárias, não competidoras com outros usos do solo, gerar um recurso natural complementar para famílias produtoras e permitir uma economia de subsistência na região. Para cada espécie foi criado um modelo de capacidade de acolhida, segmentando os resultados em categorias de prioridade territorial. De acordo com as variáveis biofísicas de estabelecimento, *P. Aquatica* L. é a espécie forrageira de maior superfície potencial disponível, com 57.793ha (27,6% da área em estudo). Em contrapartida, *T. Michelianum* Savi apresenta superfícies com categorias de estabelecimento média e baixa. Uma proposta de uso do solo indicou que a espécie mais recomendável para ser estabelecida é *A. sativa* L. com 21.512ha (10,3% do total). Estes resultados dão um marco de referência para a tomada de decisões em nível predial sobre alternativas de aproveitamento de terras com atitude forrageira.

cionan como una herramienta de toma de decisiones y solución de problemas en la zonificación del territorio (Khoi y Murayama, 2010).

Existen otras herramientas para la zonificación y determinación de áreas potenciales como la herramienta MAXENT, que es un modelo de propósito general para hacer predicciones o inferencias a partir de información incompleta. El método consiste en estimar la distribución de una especie encontrando la probabilidad de distribución de máxima entropía, sujeto a un conjunto de restricciones que representan la infor-

mación incompleta acerca de tal distribución (Phillips y Dudík, 2006).

El objetivo del estudio fue determinar zonas prioritarias potenciales para el establecimiento de especies forrajeras en el secano interior de la Región de Bernardo O'Higgins, bajo el escenario del conocimiento previo de dichas especies en cuanto a sus capacidades de crecimiento, resistencia al hábitat, facilidad de gestión en su cultivo y manejo, y aptitudes alimenticias para el ganado. Este trabajo fue realizado mediante la recopilación de antecedentes de hábitat, utilizando

para ello un esquema de análisis multicriterio, para el establecimiento de ponderaciones y órdenes de relevancia de cada una de las variables territoriales asociadas a cada especie forrajera. De esta manera, aplicando herramientas de zonificación, es posible construir mapas de zonificación para aptitud forrajera.

Material y Métodos

Área de estudio

La Región del Libertador Bernardo O'Higgins se encuentra en la zona central de Chile,

entre 33°51' y 35°01'S; y 70°02'O, adjunto al Océano Pacífico (Figura 1). El área de estudio corresponde a las comunas de Litueche, La Estrella, Marchihue y Pumanque localizadas en zonas de secano interior de esta región (Mordredo *et al.*, 2011).

Fuentes de información

La revisión documental contempló fuentes secundarias tales como estudios académicos, escritos de SIG y antecedentes de EMC. Se utilizó información de instituciones como la Corporación Nacional



Figura 1. Área del Secano Interior de la Región de O'Higgins.

Forestal (CONAF), el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), todas instituciones del Estado Chileno. En relación a los datos bioclimáticos útiles para un proceso de zonificación, una parte (precipitaciones anuales, temperatura mínima del mes más frío y temperatura máxima del mes más cálido) obtuvieron del servidor mundial WorldClim (actualización), el cual dispone de una serie de variables climáticas para su uso.

Las otras variables (textura, profundidad, drenaje, altitud, pendiente, exposición y variables bioclimáticas) se obtuvieron a partir de datos disponibles del catastro de bosque nativo para Chile, elaborados y actualizados por la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF).

Procesamiento de la información

Para procesar los datos bioclimáticos en este estudio se utilizó el Software QuantumGis de libre acceso; se procesaron las variables sobre requerimientos ambientales de las especies forrajeras seleccionadas y se representó cartográficamente la zonificación realizada.

Con respecto a la ponderación de las variables utilizadas en el estudio, estas se procesaron en el software Microsoft Office Excel 2007. Se obtuvo los pesos ponderados de las variables mediante el método de

comparación de pares de Saaty (Gómez y Barredo, 2006).

Elección de especies

Para la elección de las especies forrajeras a utilizar fue necesario tener en consideración una gran cantidad de factores, ya sean climáticos, topográficos o económicos, entre otros. Actualmente la tendencia en praderas de secano es establecer mezclas de especies y variedades para aumentar productividad y persistencia (Ruiz, 2011). Esto permite contar con especies y cultivares de ciclos de vida diferentes para cubrir mejor la variabilidad climática de nuestra área de estudio, años secos, lluviosos, normales, con el propósito de tener una mayor y más prolongada producción en el tiempo.

En el caso específico del pastoreo, se recomienda mezclar leguminosas asociadas a gramíneas anuales o perennes. En este sentido, una buena asociación

en zonas de secano es falaris con cualquier variedad de trébol subterráneo. Así, en general, la asociación leguminosa (trébol subterráneo, trébol balanza y hualputra) con gramíneas (avena y falaris) otorgan una mayor productividad y mejor calidad del forraje para los animales.

Finalmente, el forraje es un importante aporte a la economía de la familia campesina y una fuente importante de alimento para la crianza de animales, siendo las principales especies utilizadas en zonas de secano, dependiendo de la época del año (Ruiz, 2011).

Variables ambientales

En la determinación de áreas potenciales para el establecimiento de especies forrajeras, se consideraron variables climáticas, topográficas y edáficas, las cuales se indican a continuación.

Climáticas

Las variables climáticas más limitantes para el crecimiento de la vegetación son la precipitación y la temperatura. En el caso de precipitación, se utilizaron las variables de precipitación anual en mm (DMA, 2007). En cuanto a la temperatura se consideraron las variables temperatura máxima media del mes más cálido y temperatura mínima media del mes más frío. La limitación que presentan estas variables es la ausencia de estaciones meteorológicas en todos los lugares. Estas variables fueron

obtenidas del servidor mundial WorldClim, descargadas en formato *Raster* con un tamaño de cuadrícula de 1km². Los datos obtenidos de WordClim son representativos a microescala para el área de secano estudiada, y por ellos es pertinente utilizarlos frente a otras fuentes alternativas de información.

Topográficas

Se utilizaron las variables textura, drenaje y profundidad. Para la textura se utilizó el indicador 'textura superficial' que corresponde a los primeros 20cm de suelo, que se clasificó en siete categorías (SAG, 2001). La profundidad del suelo se define como la distancia en sentido vertical entre la superficie del suelo y una limitante de tipo permanente que dificulte el paso de la raíz o el paso del agua (SAG, 2001); existen cinco categorías de profundidad de suelos para la clasificación en el área de estudio. Con respecto a la variable drenaje, ésta se define como la rapidez con que el agua ingresa desde la superficie y posteriormente se mueve a través del perfil del suelo; según la clasificación del SAG (2001) existen seis clases de drenaje que se obtienen de la observación e inferencia usada para la obtención del drenaje externo, permeabilidad y drenaje interno (Tabla I).

En cuanto a la orografía se consideraron las variables altitud, pendiente y exposición. La altitud, que se expresa en msnm, es una variable que

TABLA I
CATEGORÍAS DE DRENAJE DEL SUELO

Drenaje	Descripción
Muy pobremente drenado	El agua es removida del suelo tan lentamente que el nivel freático permanece en o sobre la superficie la mayor parte del tiempo.
Pobremente drenado	El suelo permanece húmedo la mayor parte del tiempo.
Drenaje imperfecto	El agua es removida del suelo lentamente, suficiente para mantenerlo húmedo por periodos, pero no durante todo el tiempo.
Drenaje moderado	El agua es removida de tal forma que el pedón está húmedo por poca, pero significativa, parte del tiempo.
Bien drenado	Los suelos bien drenados retienen cantidades óptimas de humedad para el crecimiento de las plantas después de las lluvias.
Excesivamente drenado	El agua es removida del suelo muy rápidamente.

influye en las precipitaciones y en las temperaturas; en la zona de estudio varía entre 0 y 800msnm. La exposición u orientación se clasifica en norte, sur y plan (esta última se refiere a terrenos sin inclinación). Por último, la variable pendiente supone limitantes al establecimiento más que al crecimiento de las especies propuestas; sus valores se encuentran entre 0 y 100%.

Zonas excluyentes

Existen áreas que por su uso actual no permiten el establecimiento de plantaciones de especies forrajeras. Para efecto de este estudio las áreas establecidas como restrictivas fueron: áreas cubiertas por plantaciones forestales, zonas cubiertas por bosque nativo, las áreas que ocupan las zonas urbanas e industriales, cuerpos de agua, zonas prioritarias de conservación, áreas protegidas privadas y áreas desprovistas de vegetación cuya utilización para fines de establecimiento es infactible. En el contexto del procesamiento espacial de los datos en

el SIG, los criterios definidos se transformaron en una cubierta binaria (1/0), donde cero representa las áreas excluyentes de establecimiento, para incorporarlas a la metodología y así obtener el modelo de capacidad de acogida.

Jerarquización de los factores

Luego de describir las variables para el establecimiento de especies forrajeras en la zona de estudio, el siguiente paso fue estructurar dichos factores en forma jerárquica, descendiendo desde los más generales a los más concretos (Laskar, 2003). Para realizar esta jerarquización se utilizó el método propuesto por Saaty de jerarquías analíticas (Toskano, 2005). Este método consistió en establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas queda sujeto el número de variables a ponderar, en este caso nueve. Así se puede comparar la importancia de cada variable sobre las demás (Tabla II). Esta ponderación se realizó considerando la descripción de

los requerimientos de cada especie según los antecedentes bibliográficos investigados. Posteriormente se determinó el eigenvector principal, el cual estableció los pesos y el eigenvalor que proporciona una medida cuantitativa de los juicios de valor entre pares de factores (Gómez y Barredo, 2006). Para la asignación de los juicios de valor, existe una escala establecida que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 (Gómez y Barredo, 2006), donde 1/9 se interpreta como el peso menor que se puede asignar y 9 el mayor valor de jerarquía que presenta esta escala, mientras que el valor 1 es la igualdad de los criterios en jerarquía (Tabla II).

Establecidos los juicios de valor en la matriz de comparación, se normalizaron los valores obtenidos del cociente entre cada valor (a_{ij}) y la sumatoria de cada columna. Luego, para calcular el Eigenvector principal de la matriz se suman las ponderaciones por filas. Finalmente, esto es normalizado dividiéndose por el número de

factores n , para el caso de este estudio el número de variables será de nueve (Tabla III).

Para asignar prioridad a las alternativas de cada variable, se asignó un valor dependiendo de los requerimientos ambientales para cada especie. Así, la prioridad 1 fue asignada a la alternativa que coincide con los requerimientos de la especie seleccionada, mientras que las prioridades siguientes fueron asignadas a las siguientes alternativas de requerimiento, con menor adaptación por parte de la especie.

La metodología para determinar las áreas prioritarias y generar los modelos de capacidad de acogida se presenta en la Figura 2, donde se observa que a las variables seleccionadas se les asigna una valorización según la importancia de cada una para las especies utilizadas en el estudio, para luego normalizar y sumar estos valores con el fin de crear el modelo de capacidad de acogida y finalmente asignar los rangos de prioridad de cada una de las especies para el área de estudio.

TABLA II
MATRIZ DE COMPARACIÓN DE PARES

Factores	Pp anual (mm)	T° min. mes más frío	T° máx. mes más cálido	Textura	Prof. Suelo	Drenaje suelo	Altitud	Pendiente	Exposición
Pp anual (mm)	1								
T° min. mes más frío		1							
T° máx. mes más cálido			1						
Textura				1					
Prof. Suelo					1				
Drenaje suelo						1			
Altitud							1		
Pendiente								1	
Exposición									1

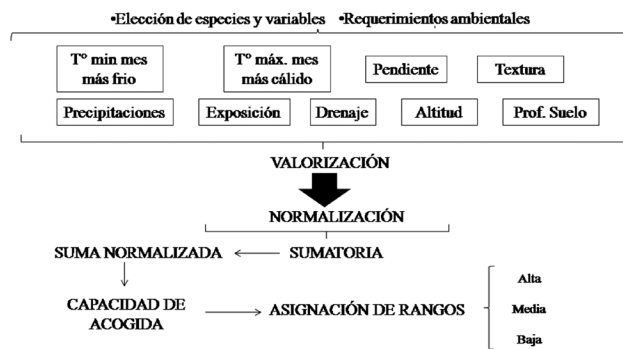


Figura 2. Enfoque metodológico para la identificación de áreas prioritarias.

TABLA III
MATRIZ CON EL CÁLCULO DE LOS PESOS Y LA NORMALIZACIÓN DE LOS FACTORES

Factores	A B C D	Eigenvector principal	Eigenvector ppal. normalizado (w_j)
A		$\sum A$	$\sum A/n$
B		$\sum B$	$\sum B/n$
C		$\sum C$	$\sum C/n$
D		$\sum D$	$\sum D/n$

El modelo de capacidad de acogida corresponde a una cobertura digital de la zona de estudio, en la que se han realizado evaluaciones de idoneidad (Bentrup y Leininger, 2002) para el establecimiento de especies forrajeras con fines silvopastoriles.

Para obtener el modelo de capacidad de acogida del territorio se ingresaron los pesos de los criterios (Breytenbach, 2011) y se continuó con las coberturas que contienen las matrices evaluadas, para finalmente ingresar las coberturas con restricción (1/0). Reunidos estos datos el programa utilizado ejecutó la regla de decisión y obtuvo como resultado una cobertura que muestra los distintos valores de capacidad de acogida para cada pixel del territorio estudiado (Karami *et al.*, 2014).

Para obtener los pesos globales o compuestos se multiplicaron los pesos relativos de la primera matriz por los pesos de la segunda y así sucesivamente hasta llegar a la última matriz (Armin y Abdolrassoul, 2010). El vector de pesos compuestos final tendrá una dimensión 1'm, siendo m el número de alternativas de decisión.

Posteriormente, se obtuvo el histograma del área de estudio con los valores de cada pixel de aptitud. Esto fue necesario clasificarlo para obtener la capacidad de acogida, lo cual se realizó según la clasificación de *natural breaks (Jenks)*, la cual agrupa valores dentro de las clases propuestas según la similitud de cada grupo y la separación que los datos poseen.

Propuesta de uso de suelo

La siguiente etapa fue realizar un mapa resultante con una propuesta de suelo para dicha área. Consistió en la comparación para cada pixel de cada especie, escogiendo la celdilla de la especie con el valor mínimo (el de mayor prioridad para su establecimiento; dado que a cada alternativa de las variables se le asignó prioridad

1, 2, 3, etc.). Como se puede observar en la Tabla IV, el número menor es el de mayor prioridad para establecimiento. Se identificó de cual especie proviene el pixel escogido, dando así una jerarquización de una especie sobre otra.

En términos prácticos, consistió en la comparación pixel por pixel de las cinco especies propuestas en el estudio, tomando el valor mínimo de dicha comparación. Para este propósito se utilizó la herramienta *Overlay* por mínimo del programa QuantumGis 2.8.1, la cual tomó el valor menor de la comparación de los pixeles por especie, dando como resultante un *Raster* con un nuevo intervalo de valores (mínimos). Fue necesario encontrar desde qué especie viene cada valor del pixel para mostrar el mapa resultante con la propuesta de uso de suelo. Con esto obtenemos la importancia de cada especie por sobre las otras.

En la Figura 3 se observa un resumen de la metodología utilizada en el estudio para la propuesta de uso de suelo.

Expresión de los resultados en el SIG

Para el tratamiento de los datos en el SIG, las variables que se encontraron en formato de vector (profundidad, textura, pendiente, exposición, drenaje y altitud) fueron transformadas a formato *raster* con la herramienta *polygon to raster*. En el caso de las variables obtenidas en formato *raster*, éstas fueron clasificadas en el SIG mediante la aplicación de los umbrales (rangos) de acuerdo a las especies forrajeras seleccionadas en este estudio. Luego fue necesario estandarizarlos para utilizar los datos en la misma escala de trabajo. Las coberturas se utilizaron en formato *raster* a una escala 1:50.000. El tamaño de la

TABLA IV
VALORES DE PRIORIDAD Y SU DEFINICIÓN

Prioridad	1	2	3	4	5
Definición	Muy buena adaptación de la especie	Buena adaptación de la especie	Media adaptación de la especie	Regular adaptación de la especie	Mala adaptación de la especie

celdilla utilizado fue de 50'50m (0,25ha). Para esto el sistema de referencia de coordenadas que se utilizó fue el WGS 84 *Universal Transversal Mercator* (UTM), huso 19S por tratarse del huso que le corresponde al área de estudio, disponible en los *software* de SIG.

Finalmente, el SIG entrega un histograma con los valores umbrales de los pixeles en formato de una cobertura *raster*, éstos se clasifican en tres categorías de aptitud según el método de *natural breaks (Jenks)* que agrupa los datos según un criterio de similitud (Garfias *et al.*, 2012). Luego de clasificados los valores se incorpora la cobertura *raster* de las restricciones que posee el área de estudio (áreas protegidas, ciudades, entre otras) para así establecer las áreas donde es ineficaz establecer las especies forrajeras.

Verificación en terreno

Para la validación de este estudio es necesaria la verificación en terreno de los resultados obtenidos. Para esto se realizó una campaña en terreno, se monitoreó las condiciones del área de estudio (suelos, presencia de especies propues-

tas, etc), con el fin de contrastar la capacidad de acogida potencial y real de las especies forrajeras propuestas en este estudio.

Resultados y Discusión

Evaluación preliminar de principales especies forrajeras

De acuerdo al estudio de Ruiz (2011), se dispone de una recomendación de especies para pradera en la zona centro-sur de Chile, las cuales constituyen la base para determinar las áreas prioritarias. Para ello se consideraron las variables ambientales expuestas en dicho estudio, las cuales forman el primer filtro para la EMC. El listado de especies contempladas en Ruiz (2011) se presentan en la Tabla V.

Evaluación de especies factibles de ser establecidas

Luego del análisis del listado de especies recomendables para el establecimiento en la zona centro-sur de Chile y las condiciones ambientales presentes en el área de estudio se llegó a la propuesta de las especies aptas para el establecimiento de forraje con fines pastoriles

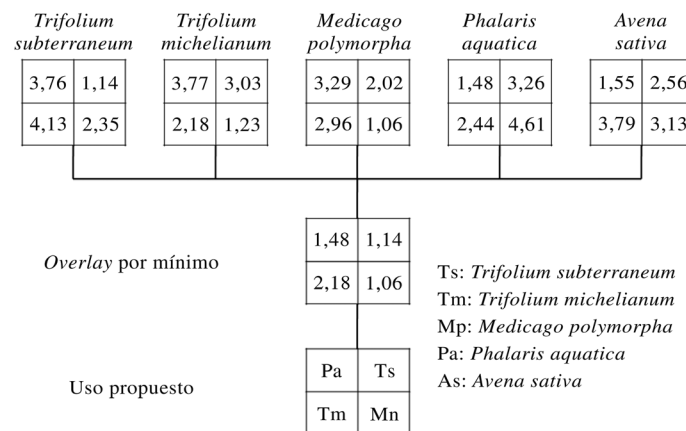


Figura 3. Metodología para la propuesta de uso de suelo.

TABLA V
ESPECIES FORRAJERAS APTAS PARA
LA ZONA DE SECANO INTERIOR

Nombre Común	Nombre Científico	Tipo
Trébol subterráneo	<i>Trifolium subterraneum</i>	
Trébol blanco	<i>Trifolium repens</i>	
Trébol rosado	<i>Trifolium pratense</i>	
Trébol encarnado	<i>Trifolium incarnatum</i>	
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>	Leguminosas
Trébol balansa	<i>Trifolium michelianum</i>	
Hualputra	<i>Medicago polymorpha</i>	
Trébol vesiculoso	<i>Trifolium vesiculosum</i>	
Serradella	<i>Ornithopus sativus</i>	
Ballicas anuales	<i>Lolium rigidum</i> o <i>L. multiflorum</i>	Gramíneas
Ballicas perenne	<i>Lolium perenne</i>	

en el secano interior del Libertador Bernardo O'Higgins. Las especies propuestas fueron *Trifolium subterraneum* L., *T. michelianum* Savi, *Phalaris aquatica* L., *Medicago polymorpha* L. y *Avena sativa* L. Estas especies, según autores como Ruiz (1996) y Carrasco et al. (2012), presentan las condiciones óptimas para el esta-

blecimiento en el área de estudio. En la Tabla VI se presentan las especies forrajeras propuestas para este estudio con sus respectivos requerimientos.

Modelo de capacidad de acogida para las especies forrajeras

Luego de realizada la operatoria se obtuvieron los valores nor-

malizados de las variables utilizadas para cada especie propuesta (Tabla VII). Para crear los modelos de capacidad de acogida fue necesario determinar las superficies clasificadas como áreas excluyentes, las que abarcan una superficie de 147.501ha, correspondientes al 70,47% del total de la superficie del área de estudio. De estas, las plantaciones forestales corresponden a 23.524ha, equivalentes al 11,24% del total de la superficie, mientras que el bosque y matorral nativo ocupan 52.747ha, equivalentes al 25,2 % del total de la superficie del área de secano interior de la región del Libertador Bernardo O'Higgins.

La ecuación para establecer la capacidad de acogida (CDA) de cada especie propuesta (Tabla VIII) es:

$$CDA = VN_{Pp} + VN_{Tmax} + VN_{Tm} + VN_{Text} + VN_{Prof} + VN_{Dren} + VN_{Alt} + VN_{Pend} + VN_{Exp}$$

donde VN valor normalizado: Pp: precipitación, Tmax: tempe-

ratura máxima, Tmin: temperatura mínima, Text: textura, Prof: profundidad, Dren: drenaje, Alt: altitud, Pend: pendiente, y Exp: exposición.

Propuesta de uso de suelo

Con los modelos de capacidad de acogida obtenidos para cada una de las especies propuestas se compararon los puntajes para así jerarquizar una especie sobre la otra. Debido a la elección de un solo valor mínimo de pixel, en esta comparación de puntajes no hubo problemas de sobre-conteo de superficie. La Figura 4 expone la propuesta de uso de suelo y la capacidad de acogida obtenida.

En la Tabla IX un resumen con la superficie para cada especie en la propuesta de uso de suelo, donde se observa que la especie con mayor superficie es *Avena sativa*.

Un análisis general de la visión en terreno de los resultados obtenidos indica que, en la práctica, las áreas calificadas

TABLA VI
ESPECIES FORRAJERAS SELECCIONADAS

Variables	Trébol subterráneo (<i>Trifolium subterraneum</i> L.)	Trébol balansa (<i>Trifolium michelianum</i> Savi)	Hualputra (<i>Medicago polymorpha</i> L.)	Falaris (<i>Phalaris Aquatica</i> L.)	Avena (<i>Avena Sativa</i> L.)
Pp. anual (mm)	380-700	500-700	400-800	>450	600-1300
T° min. mes más frío (°C)	7-13	6	5	5	5
T° máx. mes más cálido (°C)	20-30	29	28	26	30
Textura del suelo	Mod. Fina	Mod. Fina	Mod. Fina	Media	Media
Profundidad del suelo (cm)	Delgado	Delgado	Delgado	Lig. profundo	Mod. profundo
Drenaje del suelo	Imperfecto	Pobre	Bueno	Moderado	bueno
Altitud (msnm)	0-200	200-400	0-200	0-200	0-200
Pendiente (%)	0-15	15-30	0-15	0-30	0-15
Exposición	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano

Fuentes: Ruiz (1996), Squella y Ormeño (1996), Cazanga et al. (2010).

TABLA VII
VALOR NORMALIZADO POR ESPECIE

Especie Variables	Trébol subterráneo (<i>Trifolium subterraneum</i> L.)	Trébol balansa (<i>Trifolium michelianum</i> Savi)	Hualputra (<i>Medicago polymorpha</i> L.)	Falaris (<i>Phalaris aquatica</i> L.)	Avena (<i>Avena sativa</i> L.)
Pp anual (mm)	0,1410	0,2071	0,1432	0,1043	0,2011
T° min. mes más frío	0,1580	0,0396	0,2037	0,0619	0,1206
T° máx. mes más cálido	0,1954	0,0324	0,1124	0,0547	0,3253
Textura	0,3020	0,2023	0,0238	0,2116	0,0967
Prof. Suelo	0,0503	0,0521	0,0249	0,3244	0,1232
Drenaje suelo	0,0752	0,2400	0,3362	0,1706	0,0562
Altitud	0,0239	0,1142	0,0625	0,0159	0,0347
Pendiente	0,0379	0,0527	0,0487	0,0314	0,0271
Exposición	0,0163	0,0596	0,0446	0,0252	0,0151

TABLA VIII
SUPERFICIES DE CADA ESPECIE
SEGÚN PARA CADA APTITUD

Aptitud/Especie	Alta (ha)	Media (ha)	Baja (ha)	Total (ha)
<i>Trifolium subterraneum</i>	17167	27168	17472	61807
<i>Trifolium michelianum</i>	0	56349	5458	61807
<i>Medicago polymorpha</i>	44728	16187	894	61807
<i>Phalaris aquatica</i>	57793	4014	0	61807
<i>Avena sativa</i>	40796	18297	2714	61807

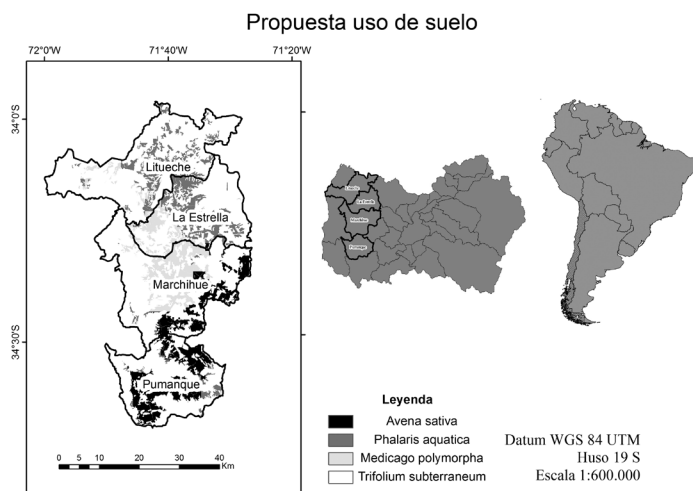


Figura 4. Mapa de capacidad de acogida para propuesta de uso de suelo.

TABLA IX
SUPERFICIE POTENCIAL DISPONIBLE
PARA PROPUESTA DE USO DE SUELO

Especie	Superficie potencial disponible (ha)	Porcentaje (%)
<i>Avena sativa</i>	21512	10,3
<i>Phalaris aquatica</i>	21195	10,1
<i>Medicago polymorpha</i>	16941	8,1
<i>Trifolium michelianum</i>	0	0,0
<i>Trifolium subterraneum</i>	2160	1,0
Excluyente	147501	70,5
Total	209308	100,0

con alta capacidad de acogida para los distintos tipos de uso del suelo, corresponden prácticamente en un 60% a terrenos que han sido utilizados tradicionalmente para la ganadería y cultivos agrícolas. Un aspecto importante a considerar en este tipo de estudios es la posibilidad de encontrar conflictos o competencia por usos del suelo que en muchos casos podrían ser incompatibles. Sobre la base de estos resultados, no existen tales conflictos, por cuanto la propuesta territorial de estas especies forrajeras para fines pastoriles estaría localizándose en áreas ya degradadas por el

sobrepastoreo, e incluso existe la opción de recuperar terrenos degradados por la erosión.

Este estudio representa un avance en la gestión del territorio en el secano interior de la Región de O'Higgins y otorga una herramienta para la economía familiar campesina de esta zona de estudio. A través de una planificación participativa se logra aumentar los ingresos, otorgando un beneficio al conjunto de las familias insertas en dicha área. Si bien se considera solo variables de tipo físico, la utilización del método de EMC compensa el hecho de no utilizar variables económicas. Ade-

más, el método de las jerarquías analíticas es una herramienta útil para la toma de decisiones con múltiples variables, otorgando mayor precisión a los estudios de esta índole, debido a que identifica en los modelos de capacidad de acogida las áreas más interesantes para el establecimiento de especies forrajeras con fines pastoriles.

Mediante la aplicación de procesos de sobreposición de criterios territoriales para cada especie analizada fue posible construir una metodología que permite identificar los umbrales para cada variable territorial al momento de establecer el análisis multicriterio. Este método es novedoso y útil, pues considera cada especie en forma individual, sin mezclar los criterios entre especies al momento de construir los mapas integrados de propuestas de usos de suelo.

La propuesta de uso de suelo través del modelo de capacidad de acogida permite conocer la distribución, superficie y aptitud de los terrenos para el establecimiento con cada especie en particular. Sin embargo, estos modelos representan abstracciones de la realidad.

Conclusiones

Existe una amplia variedad de especies forrajeras factibles de ser utilizadas en el área de estudio, por lo que es necesario conocer la finalidad del establecimiento junto con los requerimientos edafoclimáticos de las especies para obtener resultados positivos.

Del total de la superficie del área de estudio, se identificaron 61.808ha disponibles para el establecimiento de las especies forrajeras propuestas, correspondiente al 29,5% de la superficie total del área. La superficie correspondiente a áreas excluyentes correspondió a 147.501ha, equivalentes al 70,5% de la superficie total.

Se identificó a la especie *Phalaris aquatica* como la más apta para el establecimiento en la zona de estudio con una superficie de 57.793ha, correspondiente al 27,6% del total del área de estudio, debido a su buena respuesta ante las con-

diciones ambientales de dicha zona.

Trifolium michelianum fue identificada como la especie menos recomendable para su establecimiento dado que, considerando solo las variables físicas utilizadas en el estudio, no presentó áreas con categoría de aptitud alta en el área de estudio.

En la propuesta de uso de suelo, la especie que presentó mayor superficie para su establecimiento fue *Avena sativa*, con una superficie de 21.512ha, correspondiente al 10,3% de la superficie total, debido a la ventaja que tiene de adaptarse a las distintas condiciones presentes en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- AgriMED (2008) *Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos de Chile Frente a Escenarios de Cambio Climático*. Cap. IV, estudio final. Centro de Agricultura y Medio Ambiente. Chile. http://www.sinia.cl/1292/articulos-46115_capituloIV_informefinal.pdf (Cons. 09/07/2015).
- Armin M, Abdolrassoul M (2010) A fuzzy multi-criteria assessment of land suitability for land plantation with *Eucalyptus grandis*. *J. Appl. Biol. Sci.* 4(3): 47-53.
- Azócar P (2006) *Praderas de la Zona Forrajera de Secano Norte*. Publicación Miscelánea N° 32. Departamento de Producción Animal. Universidad de Chile. pp. 12-25.
- Bentrup G, Leininger T (2002) Agroforestry: mapping the way with GIS. *J. Soil Water Conserv.* 57(6): 148A-153A.
- Breytenbach A (2011) *GIS-Based Land Suitability Assessment and Allocation Decision-Making in a Degraded Rural Environment*. Tesis. University of Stellenbosch. Sudáfrica. 134 pp.
- Carrasco J, Squella F, Riquelme J, Hirzel J, Uribe H (2012) *Técnicas de Conservación de Suelos, Agua, y Vegetación*. Serie Actas N° 48. Centro Regional de Investigación Rayentué. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chile. 210 pp.
- Cazanga R, Leiva C, Retamal M (2010) *Mapas de Zonificación de Aptitud Productiva del Territorio Nacional de Especies Vegetales con Potencial de Producción de Biocombustibles*. Oficina de Estudio y Políticas Agrarias. Chile. 235 pp.

- Chaipong S, Wachrinrat C (2014) Agroforestry indices modeling for sustainable land use classification in Huai Raeng-Khlong peed watershed, Trat Province, Thailand. *Kasetsart J. Nat. Sci.* 48: 548-559.
- DMA (2007) *Glosario Meteorológico*. Dirección Meteorológica de Chile <http://www.meteochile.gob.cl/inicio.php> (Cons. 18/08/2015).
- Garfias R, Castillo M, Yáñez A (2012) *Método Fuzzy para la Identificación de Áreas Potenciales para la Producción de Leña. Aplicación de Caso: Comuna de Empedrado, Región del Maule, Chile*. Tesis. Universidad de Chile. 61 pp.
- Gómez M, Barredo J (2006) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio: en la Ordenación del Territorio*. Ra-Ma. Madrid, España. 278 pp.
- Karami E, Ariapour A, Mehrabi HR (2014) Modeling the limitative factors of forage production suitability using GIS (Case study: Aliabad Rangelands, Lorestan, Iran). *J. of Rangeland Sc.* 3: 331-341.
- Khoi DD, Murayama Y (2010) Delineation of suitable cropland areas using a GIS based multicriteria evaluation approach in the Tam Dao National Park region, Vietnam. *Sustainability* 2: 2024-2043.
- Laskar A (2003) *Integrating GIS and Multi Criteria Decision Making Techniques for Land Resource Planning*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede. Holanda. 71 pp.
- Martínez E, Fuentes J, Acevedo E (2008) *Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo*. <http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf> (Cons. 06/07/2015).
- Modrego F, Ramírez E, Yáñez R, Acuña D, Ramírez M, Jara E (2011) *Dinámicas Territoriales del Secano Interior de la Región de O'Higgins: Las Fronteras de la Transformación Agroindustrial*. Documento de Trabajo N° 80. Programa Dinámicas Territoriales Rurales. Rimisp. Santiago, Chile. 38 pp.
- Phillips S, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Romero Y (1996) *Especies y Mezclas Forrajeras*. Publicación miscelánea. Instituto de Investigación Agropecuaria. Chile. 8 pp.
- Ruiz C. (Ed.) (2011) *Recomendación de Praderas para Sistemas Silvopastoriles en la Zona Centro Sur de Chile*. Serie Actas N° 46. Centro Regional de Investigación Quilmapu. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chile. 59 pp.
- Ruiz I (1996) *Praderas para Chile*. Instituto de Investigación Agropecuaria. Chile. 734 pp.
- SAG (2001) *Pauta para Estudios de Suelo*. División de Protección de los Recursos Naturales Renovables. Servicio Agrícola Ganadero. Santiago, Chile. 21 pp.
- Squella F, Ormeño J (1996) Las bondades del falaris. Ganadería y praderas, forrajeras. Centro Regional de Regional La Platina. Instituto de Investigación Agropecuaria. Chile. pp. 32-35.
- Toskano G (2005) *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores*. Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú. 81 pp.