MODELACIÓN

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Sistema de apoyo a la toma de decisiones para la selección de especies forrajeras (STDF) en función de la oferta ambiental en Colombia

A decision-making support system to select forages according to environmental conditions in Colombia

Blanca Aurora Arce Barboza[1], Andrés Javier Peña Quiñones[2], Edgar Alberto Cárdenas Rocha[3]

[1] Ing. Zootecnista, PhD, Animal Science. Corpoica, C.I. Tibaitatá, Bogotá. barce@corpoica.org.co
[2] I.A. MSc, Meteorología. Corpoica. Bogotá. ajpenaq@gmail.com
[3] Zootecnista MSc, Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. eacardenasr@unal.edu.co

Fecha de recepción: 04/03/2013
Fecha de aceptación: 30/04/2013

ABSTRACT

Low food supply is a major problem affecting a large percentage of the livestock population in Colombia and is largely associated to inappropriate choice of forage species; and thus not well adapted to the environmental conditions of a specific region. To mitigate this problem, without incurring increasing costs associated to changing environmental conditions, it is possible to match the adaptive capacity of species to the environment in which they grow. A decision support system was developed to select suitable forage species for a given environment. The system is based on the use of existing information about requirements of the species rather than specific experimentation. From the information gathered, a database was generated and implemented on ASP.NET in C # and SQL Server database. This system allows users to search and select pastures and forage species for specific soil and climatic conditions of a particular farm or region, through a user-friendly web platform.

Key words: fuzzy sets, forage species, knowledge management, environmental supply and demand, pasture, mitigating uncertainty.

RESUMEN

La baja oferta de alimento, problema que aqueja a un alto porcentaje de la población ganadera de Colombia, se asocia, en gran medida, a la selección equivocada de especies forrajeras; es decir, con frecuencia las especies sembradas no están adaptadas a la oferta ambiental de una región en particular. Para atenuar el riesgo de la baja oferta forrajera, sin incurrir en costos asociados al cambio de la oferta ambiental, es preciso aprovechar las habilidades fisiológicas de las especies para hacer frente al ambiente donde crecen. Para ello, se desarrolló un sistema de toma de decisiones para la selección de especies forrajeras (STDF), herramienta básica en la transferencia de tecnología agropecuaria que tiene por objetivo atenuar la incertidumbre al definir las especies forrajeras aptas para un ambiente determinado. El sistema se desarrolló a partir de fundamentos básicos de la gestión del conocimiento, por lo que en su construcción no se diseñó ningún experimento, sino que se aprovechó la información existente en el país, proveniente de evaluaciones realizadas en el pasado. A partir de la información recabada, se generó una base de datos de requerimientos de las especies, de tal forma que el sistema, desarrollado e implementado sobre ASP.NET en C# y base de datos SQL Server, relaciona ambientes y requerimientos de cultivos. Dicho sistema permite a los usuarios realizar procesos de búsqueda y selección de especies de pastos y forrajes de acuerdo con las condiciones edafoclimáticas de una determinada finca o región, de manera sencilla y amigable.

Palabras claves: conjuntos difusos, forrajes, gestión del conocimiento, oferta y demanda ambiental, pastos, reducción de incertidumbre.

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

INTRODUCCIÓN

En el 2011 la mayor parte de la superficie agrícola de Colombia (más de 28 millones de hectáreas) estaba destinada a la producción pecuaria, según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2012). La ganadería es el uso del suelo más importante en los departamentos que conforman las regiones Andina y Caribe (20.400.000 ha). El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el DANE y la Corporación Colombia Internacional (2011) indican que en el resto del territorio el área dedicada a pastos y forrajes supera las 7.980.000 ha. Pese a la gran superficie que ocupan las pasturas en el país, la ganadería ha sido poco competitiva, entre otros factores, debido a la deficiente calidad del alimento que se suministra. Este factor impide que el animal exprese todo el potencial genético para producir, ya que en ocasiones no cubre los requerimientos mínimos para mantenerse y sobrevivir, tal como sucede durante las épocas secas, en las que se presenta pérdida de peso generalizada y un número significativo de muertes (Osorio *et al.*, 2011). Es claro que la producción ganadera depende de la disponibilidad y calidad del alimento y que el riesgo de una baja producción de carne y/o leche está estrechamente asociado a la disponibilidad y calidad del forraje.

Además de factores relacionados con el manejo de las pasturas, la baja oferta de forraje se asocia en muchos casos a la selección equivocada de la especie forrajera, es decir, con frecuencia las especies sembradas no son aptas para la oferta ambiental de una región en particular. Desde ese punto de vista se puede plantear que para atenuar el riesgo de tener baja oferta forrajera, sin tener que incurrir en costos asociados al cambio de la oferta ambiental, es preciso aprovechar las habilidades fisiológicas de las especies para hacer frente al ambiente en el cual crecen, como lo plantean en forma genérica Loomis & Connor (1992).

En ese sentido, el uso y localización de diferentes especies en el espacio debería basarse en el concepto de adaptación fisiológica y/o morfológica, es decir, ubicar especies forrajeras a las que, por su forma y estructura interna, algunos factores externos prevalecientes en el medio no las afectan. Esto se traduce en que hay plantas capaces de sobrevivir en zonas en las que hay déficit o exceso de algún factor ambiental (las más comunes pueden ser déficit y exceso hídrico) debido a que esas características no inhiben, inducen o promueven procesos capaces de afectar el crecimiento y desarrollo de las mismas (Baruch & Fischer, 1991; Lichtenthaler, 2003; Larcher, 2003).

Con las bases antes expuestas, se diseñó un sistema computarizado de apoyo a la toma de decisión en la selección de especies forrajeras, disponible en la web, estructurado de manera sencilla con un lenguaje e interfaces amigables que lo hacen entendible a cualquier tipo de usuario (Corpoica, 2012). El sistema fue construido a partir de información tomada de los estudios de adaptación de pastos y forrajes en diferentes ambientes (clima y suelo), realizados en los últimos cincuenta años. El sistema servirá como herramienta de apoyo a ganaderos, extensionistas y planificadores del uso de la tierra para responder algunas preguntas como: a escala regional, ¿qué especie forrajera es la más apropiada para las condiciones de clima y suelo de mi región?, ¿qué especies hay disponibles y cuáles se adaptan en diferentes departamentos y sistemas de producción ganadera?; y a escala local, ¿son las especies de pastos que crecen bien en mi finca las apropiadas para mi sistema y metas de producción? Generalmente, estas preguntas se responden sólo a escala predial, a través de ensayos de prueba y error que demandan tiempo y dinero. En este sentido, se espera que con el uso de esta herramienta, los productores disminuyan la incertidumbre y tomen decisiones acertadas que se traduzcan en una reducción del riesgo a tener pérdidas económicas por establecer especies forrajeras no aptas para un ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema se desarrolló siguiendo el concepto y los lineamientos metodológicos de lo que se conoce como gestión del conocimiento (Matos *et al.*, 2006). Para ello, se llevó a cabo un proceso sistemático de buscar, organizar, filtrar y presentar información con el objetivo de mejorar la comprensión que tienen las personas en el tema de pastos y forrajes. Es importante resaltar que, en la actualidad, el concepto de "gestionar adecuadamente el conocimiento" se ha convertido en uno de los pilares de desarrollo de las empresas y les ha permitido, a las que lo han aplicado, obtener ventajas competitivas en el mercado (Matos *et al.*, 2006). En el contexto de las organizaciones dedicadas a la investigación agrícola, este concepto se ha utilizado para aprovechar el conocimiento generado en el pasado con el fin de mejorar la efectividad de las actividades de transferencia, que según Davenport y Prusak (1998) son la última etapa en el proceso de gestionar conocimiento.

p. 215-229

Las herramientas de apoyo a la toma de decisiones se han desarrollado en diferentes áreas del conocimiento (desde la década de 1970) para ayudar a resolver problemas complejos a través de interfaces sencillas (Shim *et al.*, 2002) y han mostrado gran efectividad como instrumentos de transferencia de tecnología, ya que a pesar de su concepción básica, es decir, identificación de un problema, desarrollo de alternativas de solución y selección entre las alternativas (Beynon *et al.*, 2002), su uso reduce la incertidumbre al momento de decidir.

Lo anterior significa que para la elaboración del sistema no se diseñó un experimento específico, sino que se aprovecharon datos, información y resultados de experimentos y proyectos desarrollados en el pasado, así como la experiencia de investigadores en el área de pastos y forrajes, para recopilar información referente a la demanda ambiental de las especies forrajeras sembradas en el país. La herramienta sintetiza los resultados obtenidos en los ensayos de adaptación de especies y variedades a la oferta ambiental realizados por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

La información obtenida se sistematizó en un modelo matemático que determina la presencia de una especie en un sitio o área en función de las variables ambientales de su entorno, para lo cual se desarrolló una plataforma que relaciona ambientes generados y requerimientos de cultivos que se implementó sobre ASP.NET en C# y base de datos SQL Server, para que pueda ser utilizada en la plataforma web. Los procesos generales se muestran en la figura 1.

Información básica del sistema

El sistema funciona sobre una base de datos de requerimientos edafoclimáticos de las principales especies de pastos y forrajes cultivadas en el ámbito nacional (tabla 1).

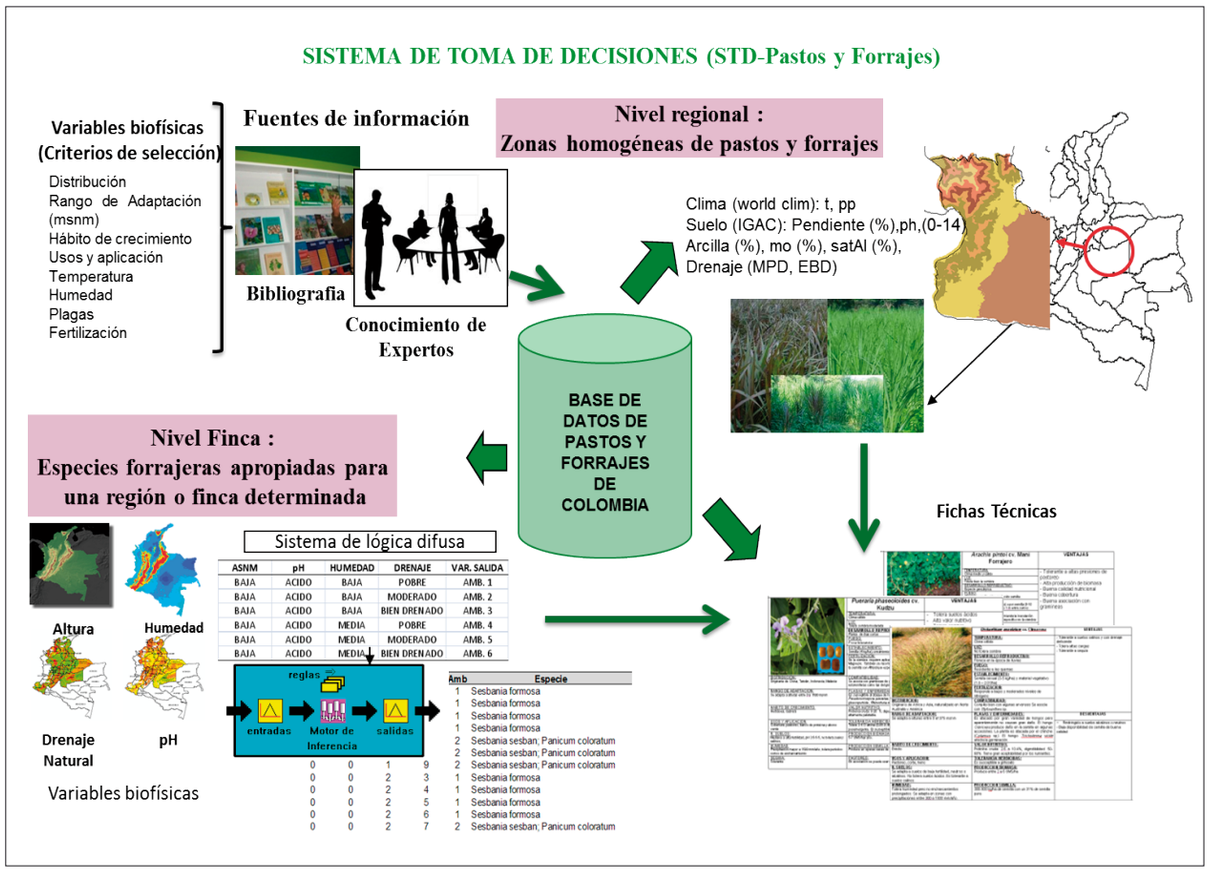

Figura 1. Procesos generales involucrados en el sistema de apoyo a la toma de decisiones para la selección de especies forrajeras (STDF)

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

p. 215-229

Tabla 1. Listado de las principales especies forrajeras en Colombia

	Nombre común	Nombre científico
1	Acacia	*Acacia decurrens*
2	Albizia	*Albizia lophantha*
3	Alfalfa	*Medicago sativa*
4	Aliso	*Alnus acuminata*
5	Angleton	*Dichanthium aristatum*
6	Arachis	*Arachis pintoi*
7	Avena forrajera	*Avena sativa*
8	Azul	*Dactylis glomerata*
9	Braquiaria común	*Brachiaria decumbens*
10	Braquipará	*Brachiaria arrecta*
11	Brizanta La Libertad	*Brachiaria brizantha cv. La Libertad*
12	Brizanta marandú	*Brachiaria brizantha cv. Marandú*
13	Brizanta piatá	*Brachiaria brizantha cv. Piatá*
14	Brizanta toledo	*Brachiaria brizantha cv. Toledo*
15	Búfalo azul	*Cenchrus ciliaris*
16	Campanilla	*Centrosema molle*
17	Canavalia	*Canavalia brasiliensis*
18	Caña forrajera	*Saccharum officinarum*
19	Capitata	*Stylosanthes capitata cv. Capica*
20	Carimagua	*Andropogon gayanus cv. Carimagua I*
21	Caupí	*Vigna unguiculata*
22	Cebada	*Hordeum vulgare*
23	Climacuna	*Dichantium annulatum*
24	Clitoria	*Clitoria ternatea cv. Tehuana*
25	Colosuana	*Bothriochloa pertusa*
26	Cratilia	*Cratylia argentea cv. Veranera*
27	Desmodium	*Desmodium heterocarpon subsp. ovalifolium cv. Maquenque*
28	Elefante	*Pennisetum purpureum cv. Merker*
29	Estrella	*Cynodon nlemfuensis*
30	Estrella africana	*Cynodon plectostachyus*
31	Estrella rojo	*Hemarthria altissima*
32	Falsa poa	*Holcus lanatus*
33	Festuca alta	*Festuca arundinacea*
34	Frijol terciopelo	*Mucuna pruriens*
35	Gordura	*Melinis minutiflora*
36	Guatemala	*Tripsacum andersonii*
37	Guinea	*Panicum maximum cv. Guinea común*
38	Humidícola	*Brachiaria humidicola cv. Común*
39	Imperial	*Axonopus scoparius*
40	Kikuyo	*Pennisetum clandestinum*
41	King grass morado	*Pennisetum purpureum x P. thyphoides*
42	Kudzú	*Pueraria phaseoloides*
43	Leucaena	*Leucaena leucocephala*
44	Llanero	*Brachiaria humidicola cv. Llanero*
45	Lotus	*Lotus uliginosus*
46	Maíz forrajero	*Zea mays*
47	Maralfalfa	*Pennisetum sp.*
48	Masai	*Panicum maximum cv. Massai*
49	Matarratón	*Gliricidia sepium*
50	Millo perlado	*Pennisetum glaucum*
51	Mombasa	*Panicum maximum cv. Mombaza*
52	Mulato II	*Brachiaria hibrido cv. Mulato II*
53	Oloroso	*Anthoxanthum odoratum*
54	Pará	*Brachiaria mutica*
55	Pasto alemán	*Echinochloa polystachya*
56	Pojuca	*Paspalum atratum*
57	Puntero	*Hyparrhenia rufa*
58	Ratana	*Ischaemum indicum*
59	Rhodes	*Chloris gayana*
60	Ruzi	*Brachiaria ruziziensis cv. Aruana*
61	Ryegrass anual	*Lolium multiflorum*
62	Ryegrass híbrido	*Lolium hybridum*
63	Ryegrass perenne	*Lolium perenne*
64	Sauco	*Sambucus nigra*
65	Soya forrajera	*Neonotonia wightii cv. Taluma*
66	Suazi	*Digitaria swazilandensis*
67	Tanzania	*Panicum maximum cv. Tanzania*
68	Trébol blanco	*Trifolium repens*
69	Trébol rojo	*Trifolium pratense*
70	Trigo amazónico	*Coix lacryma-jobi*
71	Vicia	*Vicia atropurpurea*
72	Vidal	*Bothriochloa saccharoides*

Las variables edafoclimáticas, que afectan a las especies forrajeras y se encuentran en la base de datos, se definieron con base en el criterio de expertos, para lo cual se utilizó una variación de la metodología KM-IRIS (Matos *et al.*, 2006) que consta de cuatro fases: identificación, extracción, procesamiento y almacenamiento. Entonces, se partió de una identificación de especialistas (identificar), provenientes de diversas instituciones (universidades y centros de investigación), quienes fueron consultados respecto a un número mínimo de variables con las que se pueden definir áreas de siembra de pastos y forrajes con un buen nivel de certidumbre (extraer). La decisión de usar un número mínimo de variables obedece a la posibilidad de emplear criterios prácticos, ya que si bien hay variables que brindan información importante acerca de la fertilidad del suelo -como la capacidad de intercambio catiónica efectiva-, no hay información suficiente y la que hay es poco conocida por los productores. Las variables definidas por los expertos fueron confrontadas con la información de requerimientos que está disponible en libros, revistas, informes y boletines (procesar). Una vez procesada, la información se consolidó en un informe (almacenar), donde se presentan los datos más importantes concernientes a cada especie en forma de ficha técnica (figura 2).

Las fichas técnicas se sometieron al juicio de los expertos, quienes al final del ejercicio determinaron las variables básicas que se deben emplear para tomar la decisión de establecer una o varias especies de pasto y/o forraje.

Algunas variables son de tipo continuo y la gran mayoría son de tipo discreto (tabla 2, aparecen con un asterisco); dentro de las discretas están aquellas de tipo binario, en las que simplemente se valora la tolerancia (T) o la susceptibilidad (S) de las especies frente al agente estresante y el drenaje que se caracteriza en función de cinco diferentes tipos de suelo, que en principio equivalen a la clasificación presentada por Martínez (2006),

Corpoica
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

SISTEMA DE TOMA DE DECISIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESPECIES FORRAJERAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Melinis minutiflora
(Pasto gordura, Chopin)

Origen: África. Está naturalizado en la zona de los llanos de Colombia y Venezuela.

Descripción: especie perenne, extendido, forma matas grandes poco compactas. Hábito semierecto, tallos basales que se extienden de las coronas, no forma ni estolones ni rizomas. Se desarrollan raíces en los nudos de los tallos, las cuales se extienden por encima del suelo. Los tallos erectos pueden alcanzar 1,5 m cuando las condiciones ambientales son favorables. Las hojas están cubiertas con vellosidad blanca que contiene un aceite aromático, de olor característico. Inflorescencia en panículas de 10 a 25 cm, color rojo, con semillas ligeras y aristas largas.

Adaptación:

- **Suelos:** prospera en suelos pobres, óptimo en suelos fértiles y bien drenados. No tolera encharcamiento ni inundación.
- **Luz:** tolera libre exposición y sombra parcial.
- **Altitud:** 0 – 2.200 msnm.
- **Temperatura**: 16- 26 °C.
- **Precipitación**: 900 y 3.200 mm/año.

Enfermedades y plagas: *Rhizoctonia solani* y salivazo.

Usos: pastoreo. Útil para formar cubierta vegetal en laderas secas e inclinadas. En ciertas condiciones, se puede emplear para corte, ensilaje y heno.

Calidad nutricional: proteína cruda 6% - 10% y digestibilidad 50% - 55%

Toxicidad: presenta niveles de oxalatos de 1,1% - 1,7% sin toxicidad registrada.

Potencial de producción:

- **Forraje**: puede producir de 10 a 13 t MS/ha al año, y de 4 a 5 cortes al año.
- **Animal:** en condiciones naturales se han obtenido entre 380 y 480 g/animal al día, con capacidad de carga de 1,5 a 2 animales/ha. En suelos fertilizados, se pueden alcanzar 350 g/animal al día.

Establecimiento: se debe sembrar en período de lluvia o con riego y al voleo, a razón de 25 kg/ha. Tasa de germinación de 5%. Por ser liviana, la semilla no necesita ser enterrada sino ser mezclada con arena o aserrín. También se emplea material vegetal.

Manejo: primer pastoreo de 4 a 5 meses después de la siembra, posteriormente cada 30 a 60 días, intervalos más cortos en épocas de lluvia, y mayor intervalo en épocas secas. Se recomiendan intervalos de 35 a 42 días con ocupación de 6 a 7 días. Susceptible al fuego.

Limitaciones: desaparece con pastoreo fuerte, potencial como maleza. No tolera inundaciones y no tolera salinidad. Se reportan propiedades alelopáticas.

Esta especie forrajera es nativa y se ha incluido por su valor nutritivo, como alternativa para seguir siendo manejada bajo principios de sostenibilidad.

Fuente:

- Foto: Tropical Forages (Australian Centre for International Agricultural Research, 2008).
- http://issuu.com/sea-upr/docs/manualpastos
- Tropical Forages. *Melinis minutiflora* P. Beauv. http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Melinis_minutiflora.htm
- Grupo de trabajo STDF, 2013.

MinAgricultura
PROSPERIDAD PARA TODOS

Figura 2. Ejemplo de ficha técnica de la especie pasto gordura (*Melinis minutiflora*)

p. 215-229

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Tabla 2. Variables definidas para la selección de especies forrajeras

Tipo de variable	Variable	Unidades
Climática	Altura sobre el nivel del mar	Metros
	Precipitación media anual	Milímetros
	Sombra (Luz)*	T o S
	Sequía*	T o S
Edáfica	pH del suelo	Escala de pH
	Drenaje	De 1 a 5
	Saturación de aluminio*	T o S
	Salinidad*	T o S
Orográfica	Pendiente*	T o S

T = tolerante, S = susceptible.

es decir, inundables, mal drenados, moderadamente drenados, bien drenados y excesivamente drenados. El tipo de variable (discreta o continua) se definió con base en los resultados obtenidos en la fase de procesamiento, cuando se confrontó lo que proponen los expertos con lo que está reportado en la literatura.

Las variables de tipo binario hacen referencia a desviaciones específicas de las condiciones de vida que podrían considerarse óptimas para una planta; por ende, cuando se habla de tolerancia o susceptibilidad, se califica la capacidad de la especie para mantener su funcionamiento fisiológico en dichas condiciones. En ese caso, la variable sombra (luz) califica la capacidad de una especie para mantenerse funcionando aun cuando haya una interceptación de luz superior a 30%; lo que significa que las especies subsisten en sistemas de manejo en los que el dosel de otras plantas atenúa hasta 30% de la radiación global, como se muestra en Larcher (2003). La variable sequía evalúa la capacidad de la planta para persistir en ambientes en los que hasta por tres meses consecutivos la demanda atmosférica de agua supera los aportes de agua realizados al suelo, es decir, hasta tres meses consecutivos con déficit de agua. Las otras variables, es decir, saturación de aluminio, salinidad y pendiente, califican la capacidad de una especie para permanecer en suelos con altos niveles de saturación de aluminio (superiores a 50%) o con problemas de sales (más de 5 milimhos/cm) o terrenos con pendientes abruptas (mayores de 35%).

Metodología para la toma de decisiones

El STDF permite a los usuarios tomar decisiones en dos escalas: regional y local. En la escala regional el objetivo es definir en qué departamentos se puede sembrar una especie en particular o en qué zonas de un departamento hay áreas aptas para cada una de las especies; preguntas que pueden ser planteadas por investigadores que buscan áreas para el desarrollo de experimentos, planificadores de uso de la tierra, decisores políticos, gobernadores o inversionistas. La escala local está desarrollada para que los productores tomen decisiones *in situ*, es decir, definan sobre el lote o la finca la mejor opción para su oferta ambiental.

Es de anotar que, aunque las dos escalas tienen usuarios diferentes, la filosofía detrás de la decisión es la misma, por lo tanto, todo se reduce a un tema de oferta y demanda. La demanda está soportada en el consolidado de la tabla 2 para todas las especies en análisis, mientras que la matriz de oferta difiere en función de la escala de análisis. En la escala regional se generan zonas edafoclimáticas homogéneas para definir áreas aptas para la siembra de especies de pastos y forrajes; mientras que en la escala local se generan ambientes posibles basados en aproximaciones difusas, las cuales pueden ser acompañadas de aproximaciones basadas en lógica tradicional, para tomar la decisión (figura 3).

Metodología para tomar decisiones a escala regional

La zonificación edafoclimática se sustenta en información sobre suelo y clima que reposa en bases de datos de escalas nacional y mundial. La base de datos de suelos, sobre la que se soporta gran parte del sistema, fue tomada del IGAC y está estructurada

p. 215-229

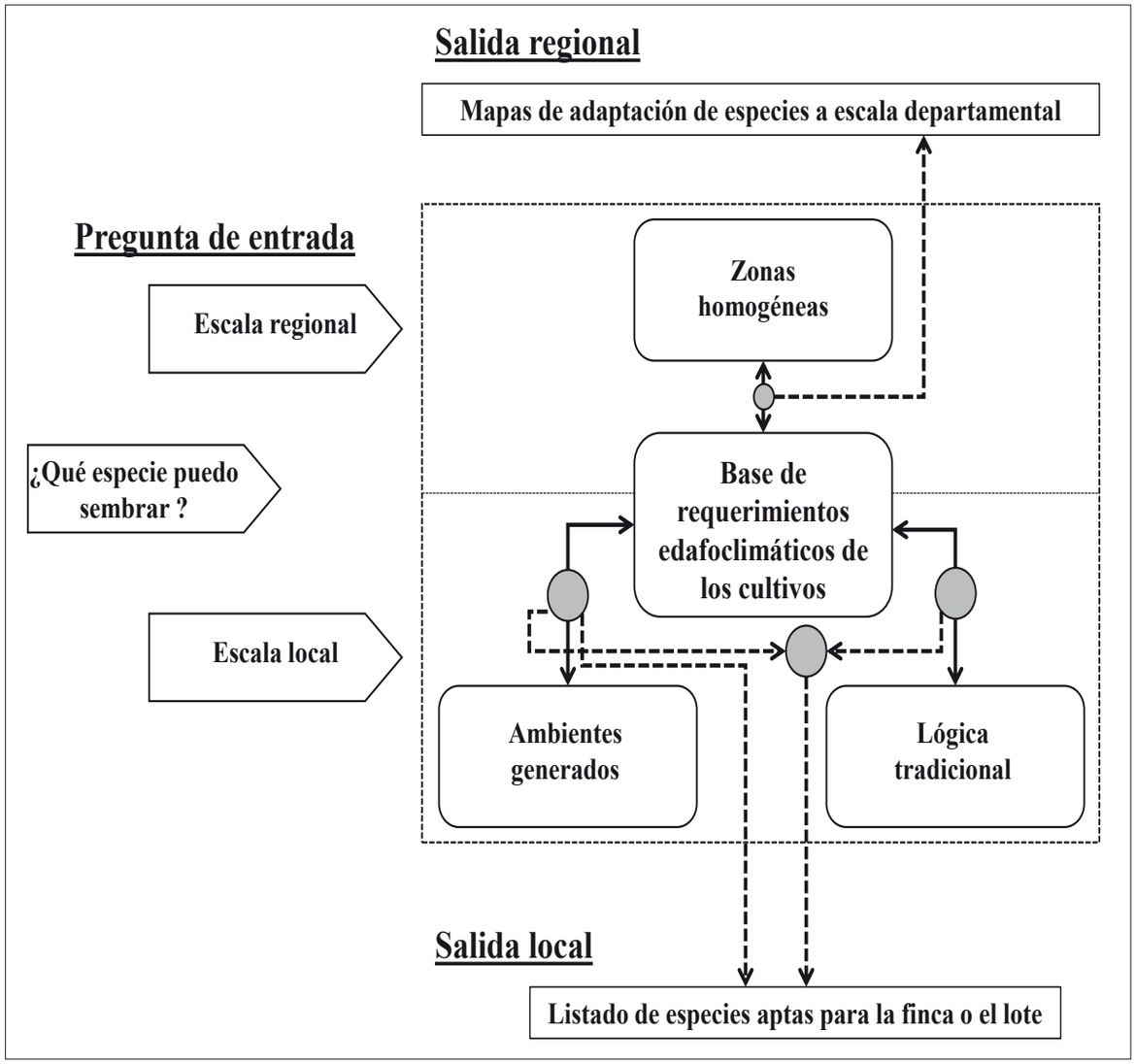

Figura 3. Evaluación de la oferta ambiental en función de la escala de análisis utilizada

sobre el concepto de unidad cartográfica. Cada unidad cartográfica está caracterizada por las variables edáficas y en este caso se extrajeron los datos de saturación de aluminio, drenaje natural, pH, porcentaje de materia orgánica, tenor de arcilla y pendiente. La base de datos de clima proviene de dos fuentes: una es WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005), de la que se extrajeron datos de precipitación media anual con una resolución de aproximadamente 1 km^2; de la misión topográfica del radar del transbordador, conocido como SRTM, se obtuvieron datos de altura sobre el nivel del mar con una resolución de 30 metros (Farr & Kobrick, 2000). La información de altura se asoció a los pisos térmicos, para lo cual se utilizó la relación existente entre la altura y la temperatura media anual (Jaramillo, 2005). De esta forma se estructuró una zonificación específica para pastos y forrajes, cuya base está planteada en la figura 4.

La información de suelos, clima y altura sobre el nivel del mar para cada departamento se estructuró a través de la plataforma del sistema de información geográfico (SIG) en un archivo de trabajo en formato MXD, el cual permite la generación digital de mapas y su exportación a formato pdf y jpg. La zonificación propiamente dicha obedece a un simple ejercicio de superposición de capas en el SIG; sin embargo, las capas superpuestas no corresponden a información primaria, por lo que antes de superponer las capas de suelo con las de clima se generaron los mapas

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

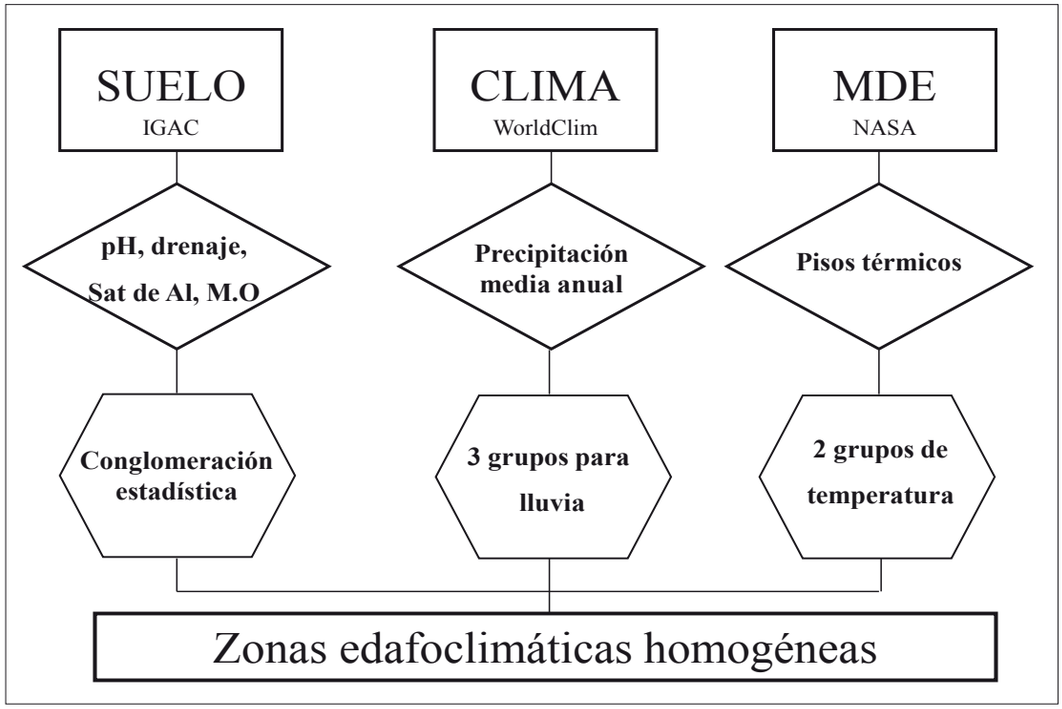

Figura 4. Esquema metodológico de la zonificación edafoclimática para pastos y forrajes

que muestran grupos de unidades cartográficas homogéneas por suelo, los mapas de pisos térmicos y los mapas de lluvia.

Los mapas de lluvia son el producto de una clasificación sencilla de las zonas, así: zonas con lluvia anual inferior a 1000 mm se consideran secas, zonas con lluvias entre 1000 y 2500 mm anuales se consideran lluviosas, y zonas con lluvias superiores a los 2500 mm se consideran muy lluviosas. Los mapas de pisos térmicos fueron construidos teniendo en cuenta que para los productores ganaderos, y aun para los investigadores, existen especies de clima frío (por encima de 1600 msnm) y de clima cálido (por debajo de los 1600 msnm). Los grupos homogéneos de suelos se generaron con base en la información de las seis variables edáficas que los describen; con el fin de que cada grupo sea homogéneo manteniendo la heterogeneidad entre los mismos, se utilizó el método de agrupación de Ward y la distancia euclidiana (Peña, 2002; Everitt, 1977), que genera conglomerados, y cuyo número dependió de la variabilidad de suelos de cada departamento. Cada conglomerado tiene unas características específicas; esta actividad se desarrolló teniendo en cuenta seis zonas del país, con sus seis análisis respectivos, así:

Llanos: Arauca, Casanare, Meta
Centro: Bogotá, Boyacá, Cundinamarca
Caribe: Bolívar, Cesar, Córdoba, Magdalena, Sucre
Occidente: Cauca, Huila, Nariño, Valle del Cauca
Santanderes: Santander, Norte de Santander
Eje cafetero: Antioquia, Caldas, Quindío, Risaralda

En este artículo se muestran los resultados del análisis de conglomerados para el departamento de Sucre (figura 5).

En la tabla 3 se muestran las características de los grupos de suelos identificados con el análisis de conglomerados en el departamento de Sucre. Dentro de cada zona agroecológica se tuvo en cuenta la altimetría y el efecto de la temperatura sobre la dispersión de las comunidades de plantas forrajeras.

Metodología para tomar decisiones a escala local

Se empleó una combinación de metodologías, basadas en principios de conjuntos difusos y lógica tradicional, que garantizan la atenuación de la incertidumbre asociada a la decisión. La lógica difusa ofrece ventajas ante los sistemas de toma de decisión actual que se basan en la definición de límites fijos (figura 6).

p. 215-229

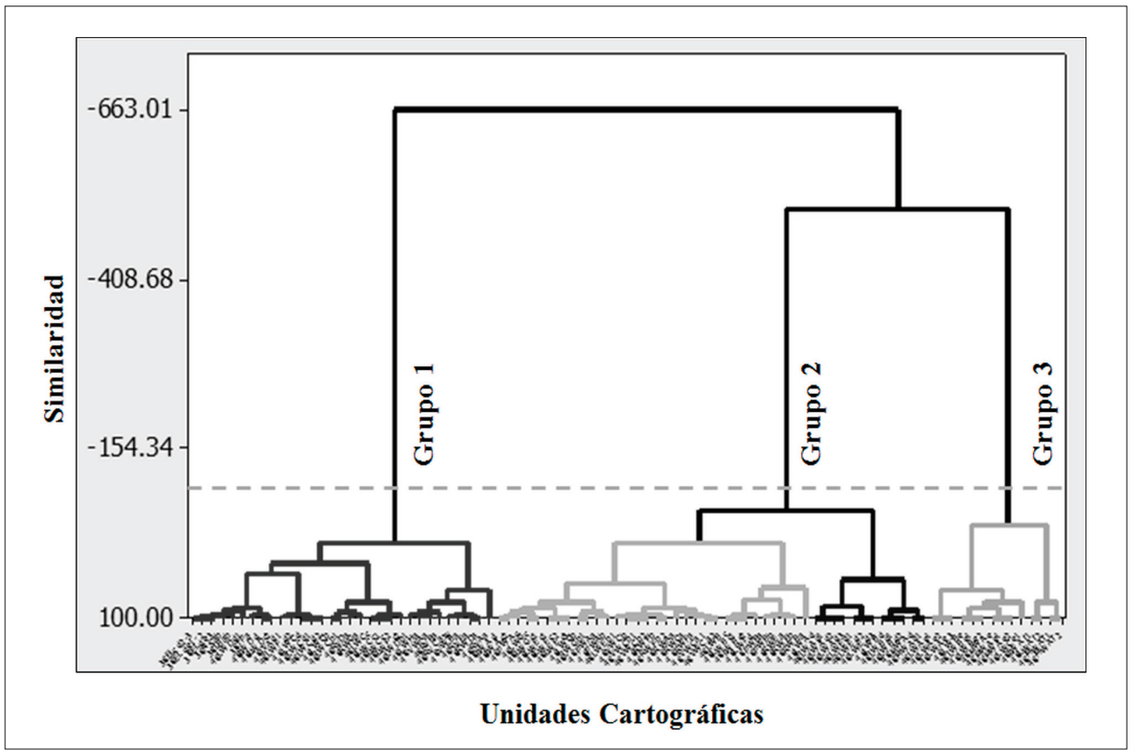

Figura 5. Grupos homogéneos de suelos generados en el departamento de Sucre

Tabla 3. Descripción de los tres grupos de suelos encontrados en Sucre

Grupo	Descripción
1	Pendientes inferiores a 12%, suelos inundables a moderadamente bien drenados, ácidos (sin problemas por efecto de aluminio) y altos contenidos de arcilla.
2	Pendientes entre 12% y 25%, suelos bien drenados, poco ácidos (6 a 7 pH), sin embargo en las zonas en las que el pH es más ácido se pueden encontrar saturaciones de aluminio entre 8% y 20% y bajos contenidos de arcilla.
3	Pendientes superiores a 30%, suelos muy bien drenados, de pH neutro con bajos contenidos de arcilla.

La decisión tomada con base en límites difusos ofrece un mayor espectro de especies. Se puede observar que en el primer caso, especies con requerimientos de altura entre 0 y 1600 msnm se descartarían en ambientes con alturas de 1601 msnm. Por otra parte, se mejora la decisión tomada con el ejercicio difuso utilizando metodologías basadas en límites fijos (lógica tradicional), como se representa en la figura 7.

Una vez seleccionadas algunas especies, con base en cinco características ambientales que tienen límites difusos, se depura la decisión usando una aproximación basada en lógica tradicional, y en la que las especies están caracterizadas por su tolerancia a sombra, sequía, salinidad del suelo y saturación de aluminio (figura 7). Las intersecciones muestran las características compartidas, por ejemplo especies que tienen tolerancia a sombra y sequía.

Definición de escenarios con límites difusos

Se definieron conjuntos difusos simples, para cada una de las variables de entrada; en este caso se definieron conjuntos representados analíticamente con funciones de membresía de tipo triangular, que según Klir *et al.* (1997) se representan como aparece en la ecuación 1.

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

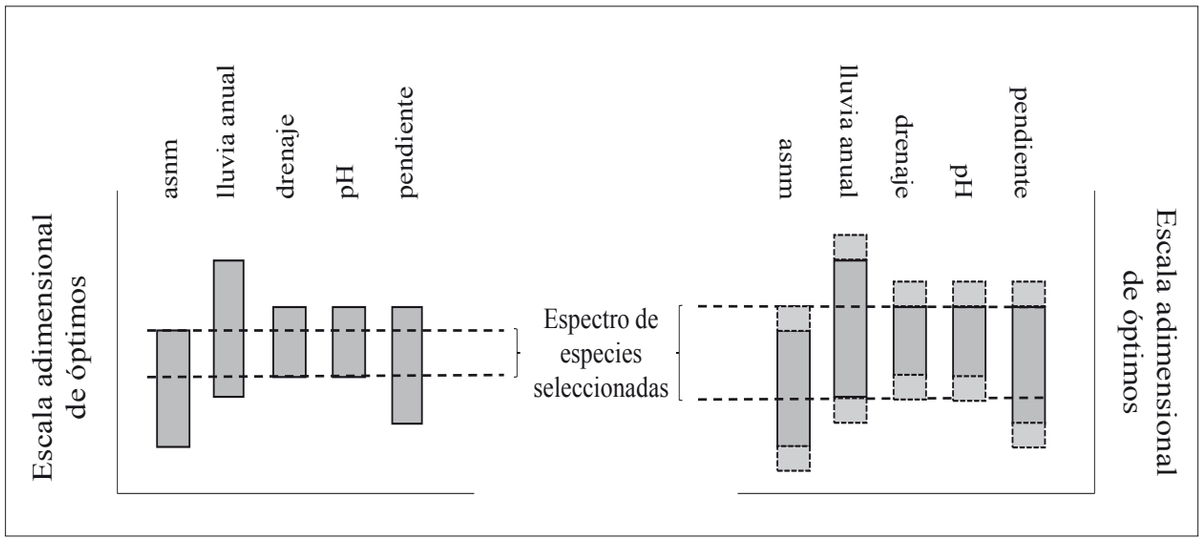

Figura 6. Diferencia entre la toma de decisiones: (a) basada en rangos con límites fijos (b) basada en rangos con límites difusos

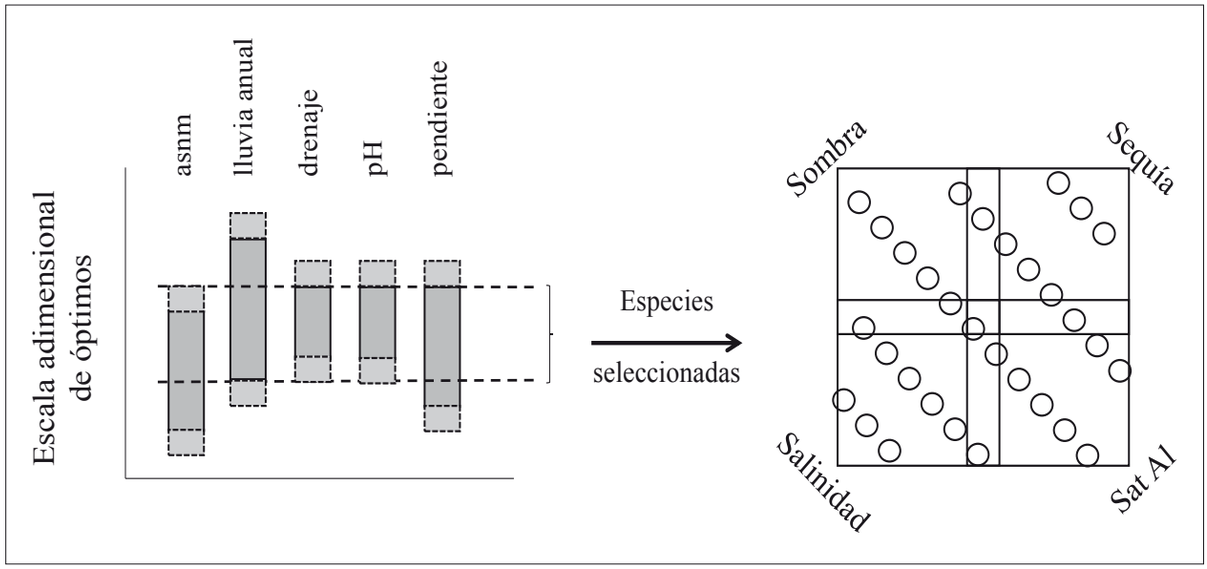

Figura 7. Esquema de la selección de especies forrajeras a escala local. a) metodología de lógica tradicional, b) variables seleccionadas en la metodología

$$A(x) = \left\{ b\left[1 \quad \frac{|x \quad a|}{0}\right] \qquad + s \right\} \qquad (1)$$

La representación del conjunto difuso en el que está la asnm correspondiente a nivel del mar (0 metros) quedaría como aparece en la ecuación 2 y la figura 8.

$$A(x) = \left\{ 1\left[1 \quad \frac{|a \quad 0|}{0}\right] \qquad 0 \qquad 250 \right\} \qquad (2)$$

x = cualquier valor posible de asnm
a = valor de altura sobre el nivel del mar (cero)
s = tamaño del módulo de difusión (250 metros)
b = porcentaje de membresía (100% correspondiente a coeficiente 1)

En este caso, las variables utilizadas fueron: altura sobre el nivel del mar (asnm), precipitación media anual (lluvia), drenaje natural (drenaje), potencial de hidrogeniones dentro del suelo (pH) y saturación de aluminio (SatAl). Se definieron los rangos de evaluación y los límites de los

mismos. A la asnm y la lluvia, por ser variables críticas en términos de adaptación de las plantas, se les adjudicó un mayor número de rangos (9 y 14 respectivamente) en comparación con el pH (6), la SatAl (4) y el drenaje (5).

Los conjuntos definidos se integraron en un sistema de lógica difusa en los que la salida (ambiente) es la combinación de las cinco variables mencionadas. La variable ambiente ofrece un espectro de 15.120 ambientes posibles (9 x 14 x 5 x 6 x 4), que en la práctica se transformaron en 6966 ambientes debido a que la diferencia entre ambientes posibles y reales se atribuye a que en la práctica hay condiciones muy poco probables, como por ejemplo, suelos con pH alto que tengan altas saturaciones de aluminio, o suelos de pH bajo en zonas con pocas lluvias.

A diferencia de lo que reportan Peña *et al.* (2010) no se hizo una base de reglas propiamente dicha, sino que se filtraron los ambientes poco probables (para definir los 6966 ambientes básicos) y luego, con base en las características de cada uno de ellos, utilizando filtros en hoja de cálculo de Excel®, se asignaron especies a cada uno de los mismos.

Depuración de las especies usando lógica tradicional

Para esto se utilizó la definición de tolerancia y susceptibilidad que se mencionó antes. En este caso no se crean ambientes sino que se califica la tolerancia de las especies seleccionadas con la aproximación difusa a las cuatro situaciones antes planteadas (sequía, sombra, salinidad y pendiente), calificándolas en forma binaria (0, 1), asignando cero cuando hay susceptibilidad y 1 cuando hay tolerancia (figura 7).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como cualquier sistema de apoyo a la toma de decisiones, STDF responde inquietudes o preguntas concretas seleccionando la(s) alternativa(s) más conveniente(s) de un grupo de opciones predeterminadas. En este caso, la entrada o *input* del sistema está implícito y el grupo de opciones predeterminadas son las especies que aparecen en la tabla 1. A escala regional la pregunta que se plantea es del ámbito departamental, tal como ¿en qué zonas de Sucre se puede establecer con alta probabilidad de éxito el pasto gordura *Melinis minutiflora*? La respuesta es un mapa con las zonas en las que el ambiente (suelo y clima) representa la amenaza más baja para el establecimiento de ese pasto

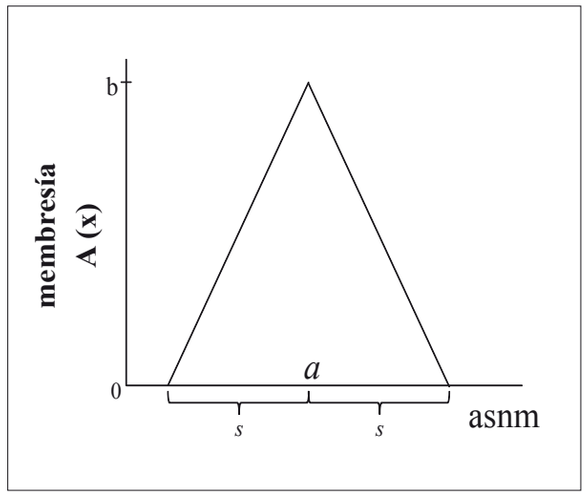

Figura 8. Función de membresía de tipo triangular

(figura 9) y por tanto, es el resultado de calcular su probabilidad de éxito.

En cada una de las zonas homogéneas determinadas (figura 10a), el pasto gordura está asociado a las zonas cálido lluvioso 2 y cálido lluvioso 3, que aparecen en la figura 10b. Este proceso intermedio se realiza para que el sistema revise los ambientes posibles dentro del departamento y selecciona, con base en la tabla 3, los ambientes idóneos para pasto gordura (*Melinis minutiflora*).

A escala local, la pregunta es ¿qué especie puedo sembrar en un lote o en una finca? En este caso el STDF utiliza la matriz de requerimientos ambientales para, a partir de información suministrada por el productor (tomador de decisiones), definir las especies mejor adaptadas al ambiente predominante. La información, que es de tipo ambiental y productivo (manejo), es suministrada por el productor (decisor) en dos tiempos; de tal forma que las especies aptas para su lote (finca) son generadas también en dos momentos (fases). La información suministrada por el STDF en el segundo momento o fase tiene menos incertidumbre, ya que en ese caso se ha suministrado información complementaria para depurar la decisión (figura 11).

La figura 11 muestra el proceso de selección de especies a escala local en la que el sistema recibe información del sitio (entrada 1) y genera una salida en la que muestra las especies aptas para ese ambiente (salida 1). Posteriormente, el decisor puede agregar certidumbre a la decisión tomada (salida 2) contestando una encuesta sencilla (fase 2).

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

p. 215-229

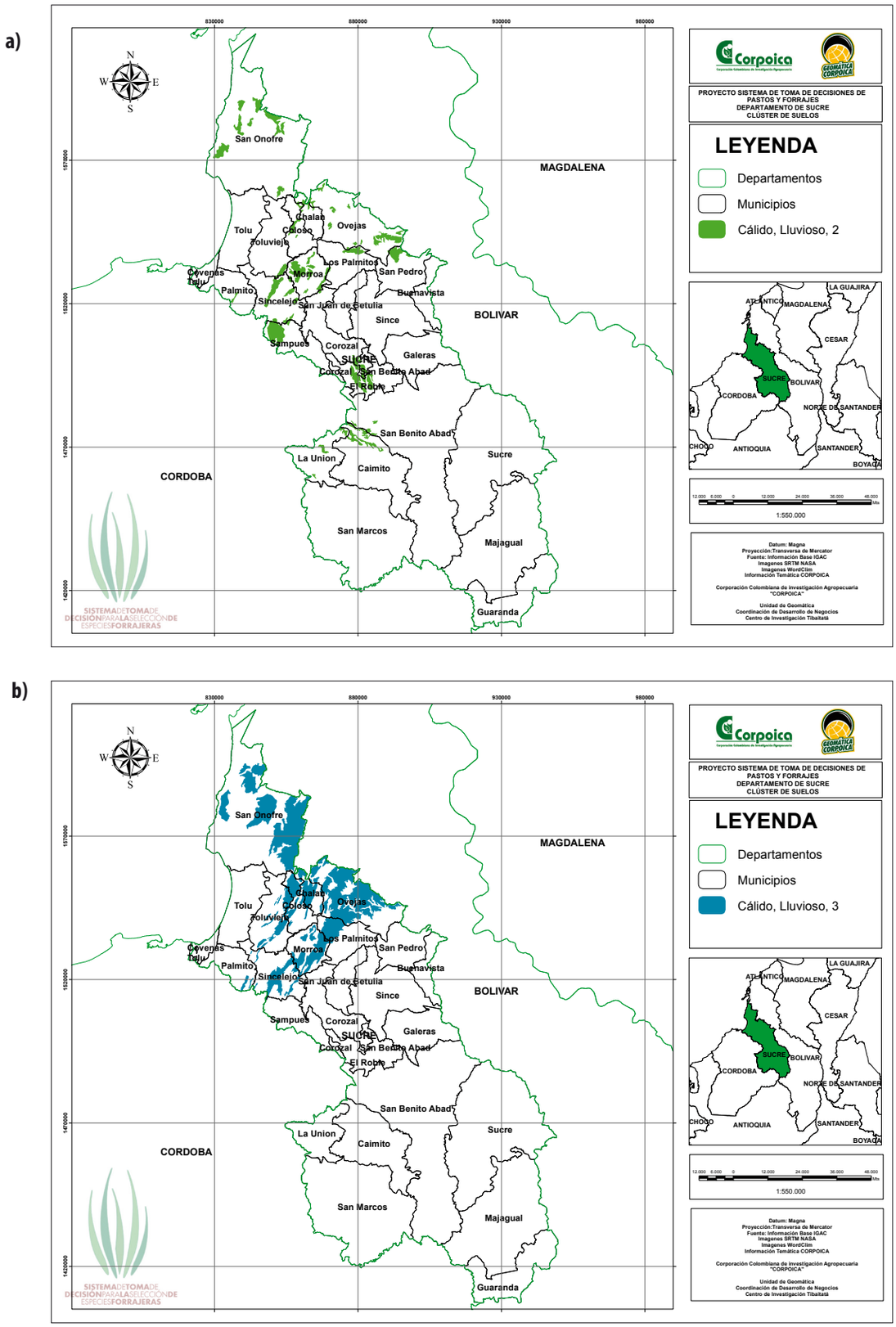

Figura 9. Salida (*output*) del sistema que muestra las zonas en las que el ambiente representa una menor amenaza para el cultivo del pasto gordura en Sucre

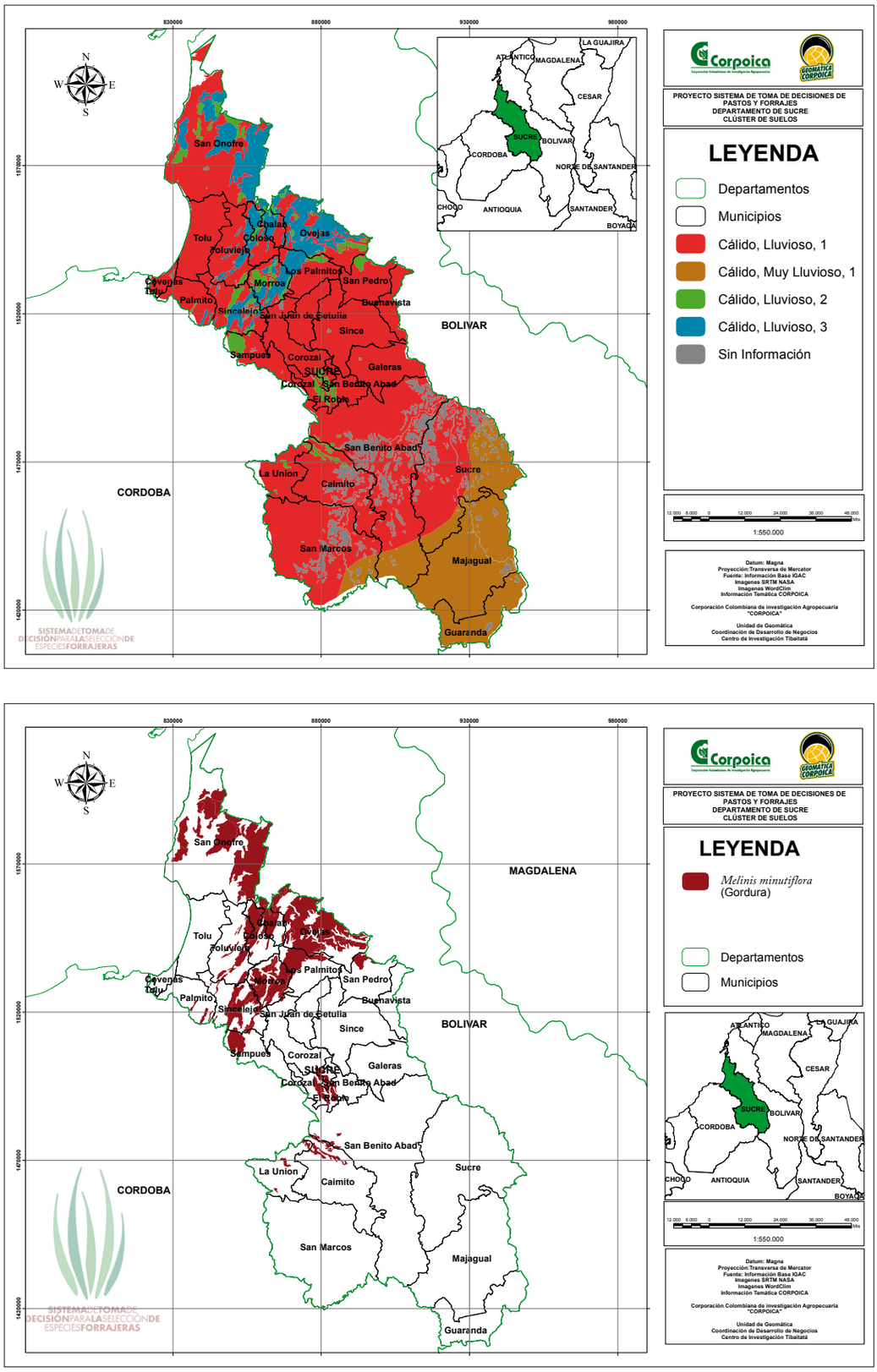

Figura 10. Zonas homogéneas para el establecimiento del pasto gordura en Sucre

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

p. 215-229

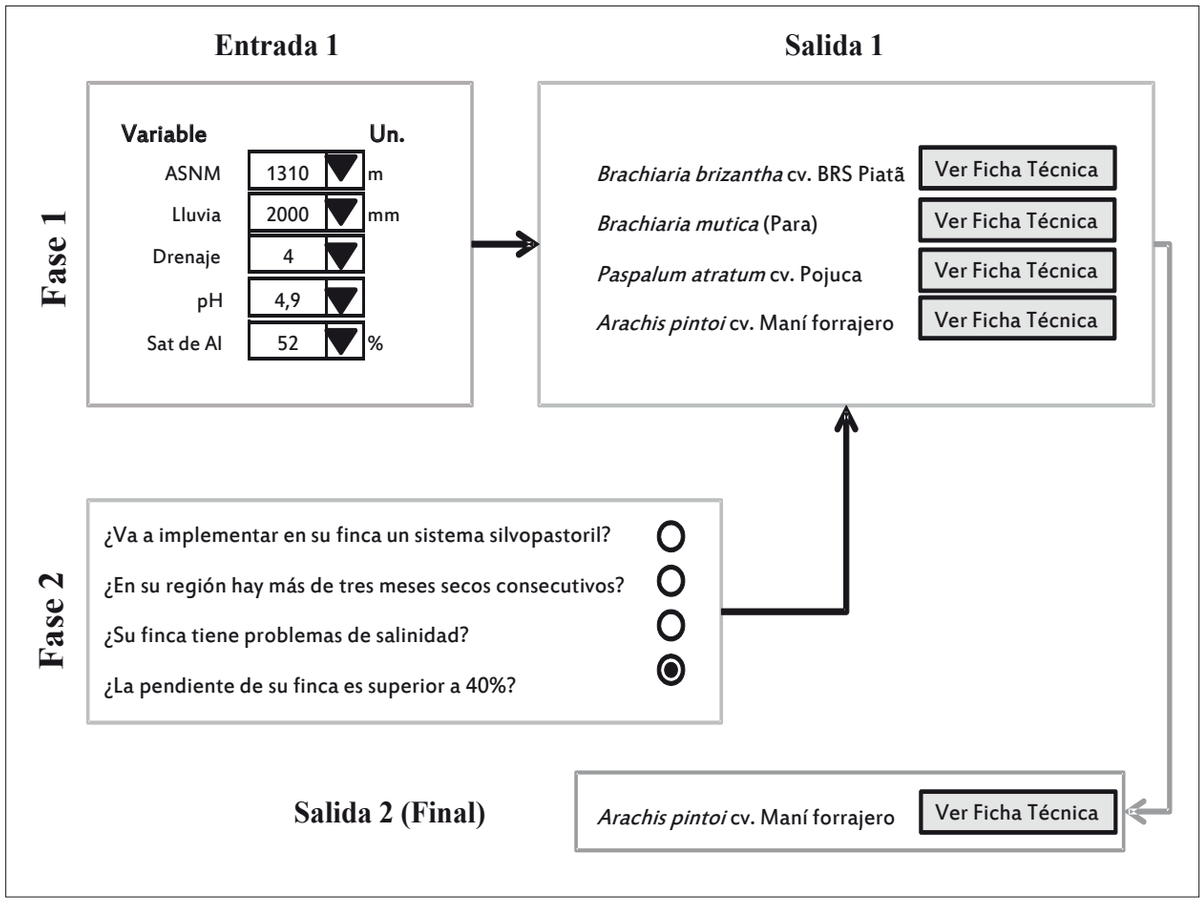

Figura 11. Proceso de selección de especies a escala local

CONCLUSIONES

Es posible aprovechar las metodologías asociadas a la gestión del conocimiento para mejorar la transferencia de tecnología agropecuaria y asegurar su adopción. En este caso, mediante un grupo de metodologías asociadas para el tratamiento de la información capturada experimentalmente en el pasado, se procesó y se generó un software amigable en web sobre ASP.NET en C# y base de datos SQL Server, alojado en la plataforma de Corpoica y disponible en el portal Siembra, que permite a productores y profesionales del sector ganadero la selección de especies forrajeras más adecuada para su entorno y ambiente específico.

El sistema de toma de decisión para la selección de especies forrajeras (STDF) es un sistema de apoyo a la toma de decisiones continuo y dinámico (por lo que su actualización es permanente) que sirve para seleccionar especies de pastos y forrajes en función de la demanda ambiental de los forrajes y las condiciones edafoclimáticas de diferentes regiones del país. Permite a los usuarios visualizar mapas de departamentos con áreas homogéneas en términos de clima y suelo para la siembra de pastos y forrajes. Además, permite a usuarios realizar procesos iterativos para la selección de especies de pastos y forrajes de acuerdo con las condiciones edafoclimáticas de una determinada finca y tipo de uso deseado (pastoreo, corte y acarreo, ensilaje, heno), visualizando fichas técnicas por especie forrajera seleccionada.

El STDF es un sistema de apoyo a la toma de decisiones para ganaderos, planificadores del uso de la tierra, asistentes técnicos e investigadores que contribuirá a reducir el riesgo de pérdidas económicas por establecimiento de especies forrajeras no aptas para un ambiente y un sistema de producción (reducción de incertidumbre). El STDF es continuo y dinámico por lo que su actualización es permanente, especialmente en la inclusión de más y nuevas especies forrajeras.

p. 215-229

AGRADECIMIENTOS

Esta versión del STDF fue financiada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); se desarrolló a través de un proyecto de Corpoica, verificado por los investigadores de pastos y forrajes de los centros de investigación Tibaitatá, Turipaná, La Libertad, Motilonia y El Nus, como también validado por asistentes técnicos de varias instituciones.

REFERENCIAS

Baruch Z, Fisher M. 1991. Factores climáticos y de competencia que afectan el crecimiento de la planta en el establecimiento de pasturas. En: Lascano CE, Spain J (editores). Establecimiento y renovación de pasturas: conceptos, experiencias y enfoques de investigación. Sexta Reunión Comité Asesor RIEPT. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia, pp. 103-142.

Beynon M, Rasmequan S, Russ S. 2002. A new paradigm for computer-based decision support. Decision Support Systems 33 (2):127–142.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. 2012. Informe técnico final del proyecto: Desarrollo y validación de un sistema de toma de decisiones (STD) basado en modelos matemáticos para determinar ambientes idóneos para el establecimiento de diferentes especies de pastos y forrajes en Colombia. Blanca Arce, PhD, líder del proyecto. Corpoica, Mosquera, Colombia (sin publicar).

Davenport T, Prusak L. 1998. Working knowledge: How organizations manage what they know. Harvard Business School Press, Boston, p. 224.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2012. Resultados Encuesta Nacional Agropecuaria 2011. Bogotá, Colombia.

Everitt B. 1977. Cluster analysis. Heinemann Educational Books, London, p. 124.

Farr T.G, Kobrick M. 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. American Geophysical Union Eos, 81: 583-585.

Hijmans R, Cameron S, Parra J, Jones P, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25 (15):1965–1978.

Jaramillo A. 2005. Clima Andino y café en Colombia. Editorial Blanecolor, Manizales, p 192.

Klir G, St Clair U, Yuan B. 1997. Fuzzy set theory. Foundations and applications. Prentice Hall PTR, London, p. 245.

Larcher W. 2003. Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups. Springer-Verlag, Berlin, p. 512.

Lichtenthaler H. 2003. El estrés y la medida del estrés en plantas. En: Reigosa M, Pedrol N, Sánchez A (editores). La ecofisiología vegetal: una ciencia de síntesis. Thomson-Paraninfo, Madrid, pp. 1-58.

Loomis R, Connor D. 1992. Crop Ecology: productivity and management in agricultural systems. Cambridge University Press, Cambridge, p. 538.

Martínez LJ. 2006. Modelo para evaluar la calidad de las tierras: caso del cultivo de papa. Agronomía Colombiana 24(1):96-110.

Matos G, Chalmeta R, Coltell O. 2006. Metodología para la extracción del conocimiento empresarial a partir de los datos. Información Tecnológica 17(1):81-88.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Corporación Colombia Internacional. 2011. Resultados Encuesta Nacional Agropecuaria 2010. Bogotá, Colombia.

Osorio C, Anzola H, Restrepo J. 2011. Programa de alimentación bovina – PAB: El ganado paga, pero bien alimentado. Carta Fedegan 122:20-38.

Peña A, Palacio L, Arce B. 2010. Lógica difusa: una alternativa metodológica en la determinación de ambientes idóneos para el establecimiento de especies de pastos y forrajes en Colombia (primera aproximación). Revista Colombiana de Ciencia Animal 3:57-63.

Peña D. 2002. Análisis de datos multivariantes. McGraw-Hill, Madrid, p. 539.

Shim J, Warkentin M, Courtney JF, Power DJ, Sharda R, Carlsson C. 2002. Past, present and future of decision support technology. Decision Support Systems 33(2):111-126.

© 2013 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria