

## MODELO ESPACIAL DE DISTRIBUCIÓN DEL ECOTONO BOSQUE-PÁRAMO EN LOS ANDES VENEZOLANOS. UBICACIÓN POTENCIAL Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

### SPATIAL MODELLING OF THE FOREST-PARAMO ECOTONE DISTRIBUTION IN THE VENEZUELAN ANDES. POTENTIAL LOCATION AND CLIMATIC CHANGE SCENARIOS

*Suárez del Moral, Patricia<sup>1</sup> y Chacón-Moreno, Eulogio<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,  
Universidad de Los Andes, Mérida (5101), Venezuela. E-mail: delmoral@ula.ve  
<sup>2</sup>Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias,  
Universidad de Los Andes, Mérida (5101), Venezuela. E-mail: eulogio@ula.ve*

#### RESUMEN

En los Andes venezolanos la transición de la vegetación hacia el páramo, representada por el bosque paramero, no es uniforme a lo largo del núcleo central de la cordillera, ubicándose a mayores elevaciones en las zonas más húmedas y a menores elevaciones en zonas más secas. Las temperaturas, régimen hídrico, exposición y pendiente son los principales condicionantes ambientales para el establecimiento de la vegetación. En este trabajo se recolectó información climática proveniente de estaciones meteorológicas y se generó información topográfica a partir de un modelo digital de elevación con la finalidad de dilucidar la interacción que pudiese existir entre variables ambientales y variaciones en la ubicación altitudinal del bosque paramero. Partiendo de estos resultados se modeló la ubicación altitudinal del límite bosque-páramo, ubicación que parece señalar que no es el total anual de precipitaciones lo que determina que el límite en zonas secas se encuentre más abajo sino la estacionalidad y contraste entre épocas secas y húmedas. Con el modelo obtenido se evaluó la potencial distribución del bosque paramero ante aumentos de temperatura y disminución de las precipitaciones según proyecciones del IPCC, Se encontró que la disminución del área del bosque paramero pudiera ser de 7% a 36%.

**Palabras clave:** bioclima, bosque preparamero, Climáticos de Sobre (CEM), Modelos, SIG

#### ABSTRACT

In the Venezuelan Andes the transition towards the Páramo, the pre-páramo forest, is not uniform all along the central cordillera and it's located at higher altitudes in moist areas and lower altitudes in dryer areas. Temperatures, hydrologic regime, exposure and slope are the main variables that determine the establishment of the vegetation. In this work climatic data was collected from meteorological stations and topographic data was generated from digital elevation models (DEM) of the area in order to clarify the interaction that could exist between these environmental variables and the variations in the location of the paramero forest. Out of these results the altitudinal location of the forest-páramo limit was modeled and it suggests that rather than the total amount of precipitation is the seasonality and contrast between dry and moist seasons that determine the lower forest-páramo limit in dry areas. The model was later used to evaluate the potential distribution of the preparamo forest under the effects of temperature increase and lowering of precipitation according to projections made by the IPCC. The result was that the area loss could go from 7% to 36%.of paramero forest.

**Key words:** bioclimate, Climate Envelope Models (CEM), GIS, preparamero forest

## INTRODUCCION

La variabilidad climática y topográfica de Los Andes venezolanos determina en gran medida la presencia y distribución de diversos tipos de vegetación a lo largo del gradiente altitudinal. Esta vegetación, sin embargo, no ha sido estable a lo largo del tiempo. Las evidencias de desplazamientos de la vegetación en Los Andes ante variaciones en las condiciones climáticas han sido estudiadas por numerosos investigadores, donde la temperatura es considerada como un factor determinante en el patrón de distribución de la vegetación a lo largo del gradiente altitudinal.

Resultados de estudios palinológicos en el neotrópico, específicamente en Los Andes, indican una dinámica de avance y retroceso en la línea de bosque como resultado de la variación climática durante el pleistoceno (Van Der Hammen 1974). Específicamente mayores temperaturas traían como consecuencia el avance de la línea de bosque sobre el ecosistema inmediato superior, el páramo, y menores temperaturas ocasionaban un avance del páramo sobre el bosque.

Para el caso de los páramos venezolanos, estos presentaban en zonas cercanas a Mucubají condiciones más frías y secas hace 13.000 años que las actuales, (Graf 1996). Reconstrucciones climáticas para Los Andes venezolanos, evidencian que hace aproximadamente 20 mil años los límites inferiores de los glaciares en la región estaban entre 850 m y 1420 m por debajo de su posición actual (Lachniet y Vazquez-Selem. 2005, Stansell *et al.* 2005, Weingarten *et al.* 1990). Estos resultados concuerdan con trabajos realizados en Colombia donde se presentan evidencias de una migración de hasta 1100 metros de la biota de alta montaña a zonas bajas ante temperaturas de 5-6 °C menores que las actuales (Rull *et al.* 2007).

Esta dinámica de la vegetación ante las condiciones climáticas evidencian que la línea de bosque no ha sido altitudinalmente estable a lo largo del tiempo, resultados que apoyan la idea de que las zonas de transición entre un tipo de vegetación y otro (ecotonos) son las más susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales (Brubaker 1986, Camarero y Gutiérrez 2004).

Los páramos venezolanos ubicados sobre la cordillera de Mérida ocupan un rango altitudinal desde los 2800 m hasta los 4800 m, (Monasterio y Reyes 1980) siendo su límite inferior la línea de bosque paramero con la selva nublada en las vertientes húmedas y con

el bosque siempreverde seco en las vertientes secas. Se reconoce que el ecotono o transición bosque-páramo no es uniforme, pudiendo encontrarse a distintas altitudes que pueden variar entre los 2700 hasta los 3000 m de altitud (Ataroff y Sarmiento 2004). Esta peculiar distribución espacial del ecotono pareciera estar respondiendo a otras variables además de la temperatura, la cual según la regresión altotérmica para Los Andes venezolanos (Andressen y Ponte 1973, Sarmiento 1986), estaría entre los 11,4 °C promedio en el límite inferior y los 9,6 °C promedio en el límite superior. Se reconoce que otros factores ecológicos pueden afectar este patrón, entre estos las características del terreno, pendiente, exposición y microtopografía (Dalen y Hofgaard 2005, Kimball y Weihrauch 2000).

Tomando en cuenta que la distribución de la vegetación depende principalmente de las condiciones climáticas y que las proyecciones de cambio climático para Venezuela indican aumentos en la temperatura, se plantea la interrogante ¿qué sucedería en escenarios de aumento de temperatura con el ecotono bosque-páramo en el núcleo central de la cordillera de Mérida, tomando en cuenta las condiciones topográficas de la ubicación de la línea de contacto bosque-páramo?

Las predicciones del MARNR (2005) para el país con base a las proyecciones del IPCC, presentan aumentos de temperaturas de más de 1,5 °C en los próximos 30 años con una marcada disminución de las diferencias entre máximas y mínimas y un aumento global de temperaturas de hasta 6 °C para el año 2100 (Hulme 1999). Se ha observado en Venezuela que a lo largo del siglo XX las temperaturas máximas presentaron tendencias a la disminución con un valor cercano a 1,1 °C a una tasa de 0,18 °C cada 10 años y las mínimas con tendencia al aumento con un valor aproximado de 3,2 °C a una tasa de 0,37 °C cada 10 (MARN, 2005), lo que origina una disminución en la amplitud térmica diaria que pudiera traer consecuencias importantes en las vertientes secas de Los Andes venezolanos, donde según Monasterio (1980), las oscilaciones diarias son mayores que en las húmedas.

La evaluación y análisis de la interacción entre la temperatura y las características topográficas a las cuales está asociada la presencia del límite del continuo de bosque permitió construir un modelo de respuesta del desplazamiento altitudinal o patrón de distribución del bosque paramero. Para ello se evaluó estadísticamente la relación entre la distribución actual del ecotono o bosque

paramero, utilizando como base el Mapa de Ecosistemas de Los Andes venezolanos (Josse *et al.* 2009b) con mapas de distribución de variables ambientales tales como pendiente, exposición, temperaturas y precipitación.

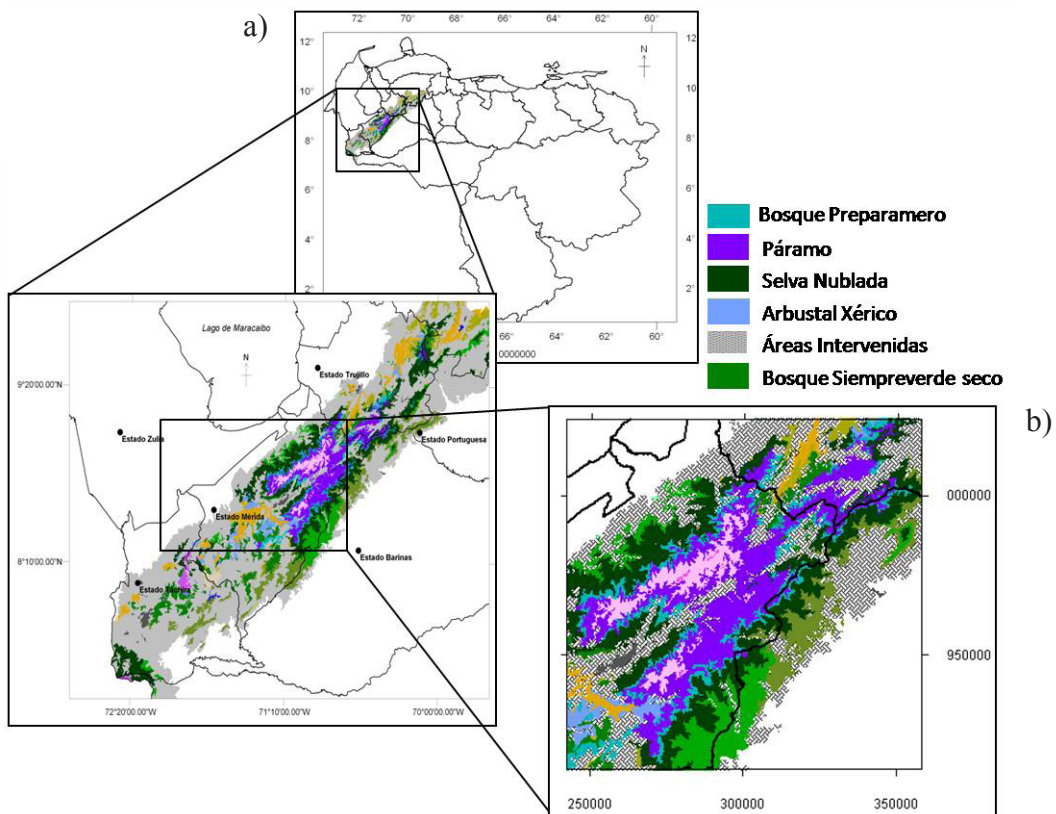
La necesidad de conocer la respuesta y distribución de un ecosistema ante los posibles cambios climáticos requiere de herramientas que permitan predecir dicha distribución. También se puede tener una idea de cómo sería el comportamiento de una zona tan sensible al cambio como el ecotono bosque-páramo en el contexto del desarrollo de planes de acción para resguardar la biodiversidad presente en el lugar.

Para cumplir con este objetivo se ha desarrollado un modelo de distribución potencial actual del ecotono y otro bajo varios escenarios de cambio climático. Las evaluaciones realizadas para generar el modelo de distribución potencial del bosque paramero, consiste de evaluaciones estadísticas propias de un

modelo empírico, y el establecimiento de relaciones causa-efecto para dar respuesta a la interrogante de cuales variables ambientales (causa) determinan la aparición del límite (efecto).

En este sentido existen estudios en los que se considera la actual distribución geográfica de especies vegetales y las condiciones ambientales propias de tal área de distribución, para predecir cuál sería la nueva distribución de la especie ante cambios en esas condiciones ambientales (Hijmans y Graham 2006). Estos estudios se aplican a través de lo que se conoce como Modelos envolventes de clima o CEM por sus siglas en inglés (Climate envelope models) y para la generación del modelo de distribución potencial se partió del mismo principio de distribución, en este caso del bosque paramero, según las condiciones ambientales de tal área de distribución.

El objetivo de este trabajo es determinar a escala regional el patrón de distribución del borde de



**Figura 1.** a) Ubicación relativa del área de estudio y b) Detalle del mapa de ecosistemas de Los Andes venezolanos. Se aprecia la distribución del Bosque preparamero y la continuidad espacial del núcleo central de Páramos. Nótese las diferencias entre las unidades ecológicas en contacto con este bosque; selva nublada, bosque seco o arbustal xérico. Modificado de *Josse et al.* (2009).

contacto entre la vegetación de bosque y el Páramo en relación con la temperatura, precipitación, altitud, pendiente y exposición, y generar modelos de distribución altitudinal del borde bosque-páramo en escenarios de cambio climático.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

La realización de este trabajo se enmarca en Los Andes venezolanos, específicamente en la cordillera de Mérida la cual es una cadena montañosa ubicada entre los 7° 30' y 10° 10' latitud norte, 69° 20' y 72° 50' de longitud oeste (Schubert y Vivas 1993). Los Andes se caracterizan geomorfológicamente por el modelado glacial por encima de los 3000 m con los circos, aristas y valles en "U" y por modelado fluvio-glacial por debajo de ese nivel con Till morrénico y terrazas fluvio-glaciales. La vegetación de la zona responde principalmente a las variaciones en gradiente termo-hídrico (Monasterio y Reyes 1980) donde se reconocen principalmente dos patrones, el que rige a las vertientes húmedas y el que rige a las secas.

El área de estudio seleccionada corresponde al núcleo central de Páramos que mantiene una continuidad espacial (figura 1). En esta área se restringió el trabajo al ecosistema de bosque paramero y sus zonas de contacto inferior (bosque seco, selva nublada y arbustal xérico) y contacto superior (Páramo).

Este bosque se caracteriza por tener tres estratos diferenciados: arbóreo, arbustivo y sotobosque (Arzac 2008), con coexistencia de elementos florísticos propios de mayores elevaciones tal como *Libanothamnus neriifolius* Ernst. y elementos florísticos de menores elevaciones característicos de selva nublada o bosque seco según sea la vertiente húmeda o seca respectivamente, encontrándose también la presencia de elementos propios de la transición entre un ecosistema y otro. Este bosque recibe también el nombre de bosque paramero (Monasterio 1980) y bosque altimontano norte-andino siempreverde en el mapa de Ecosistemas de Los Andes del Norte y Centrales (Josse *et al.* 2009a).

### Muestreo de factores ambientales

Con ayuda del Mapa de Ecosistemas de Los Andes del Norte y Centrales (MEANC) (Josse *et al.* 2009b) y la imagen de satélite Landsat año 2001 de la región, se seleccionaron 79 ventanas de muestreo de los distintos tipos de

contacto, tanto superior como inferior del bosque paramero, correspondiendo el ecotono superior al contacto bosque paramero-páramo y el inferior a los contactos selva nublada-bosque paramero, bosque siempreverde seco-bosque paramero y arbustal montano xérico-bosque paramero. En la figura 2 se presenta la distribución de las unidades de muestreo a lo largo del bosque paramero representado en el MEANC.

El criterio de selección de ventanas de muestreo se basó en evitar zonas intervenidas y que los muestreos estuviesen distribuidos uniformemente a lo largo de la extensión del bosque paramero sobre el continuo de la cordillera. Se generaron en total 79 ventanas dentro de las cuales se seleccionaron dos áreas de muestreo, una para el contacto superior y otra para el contacto inferior.

La selección del área de muestreo se hizo utilizando las características espectrales de los píxeles de la imagen de satélite a manera de garantizar la transición entre ecosistemas. Dado que de este proceso resultaron dos áreas de muestreo por ventana, una de contacto superior y otra de contacto inferior se obtuvo un total de 158 áreas de muestreo. Las variables ambientales consideradas fueron: precipitación, temperaturas medias, máximas y mínimas, pendiente, exposición y altitud, esta última considerada sólo para determinar la ubicación de presencia de bosque paramero en cada área de muestreo de cada ventana.

Las variables se obtuvieron siguiendo la metodología descrita en Suárez del Moral (2009), donde la información climática se obtuvo a partir de interpolaciones y regresiones lineales de datos de 89 estaciones meteorológicas del estado Mérida monitoreadas por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Universidad de Los Andes. De las cuales 77 contaron con registros de precipitación y 12 de temperatura. Las variables topográficas por su parte, se generaron a partir del DEM del área de estudio obtenido de *United States geological Survey* (USGS).

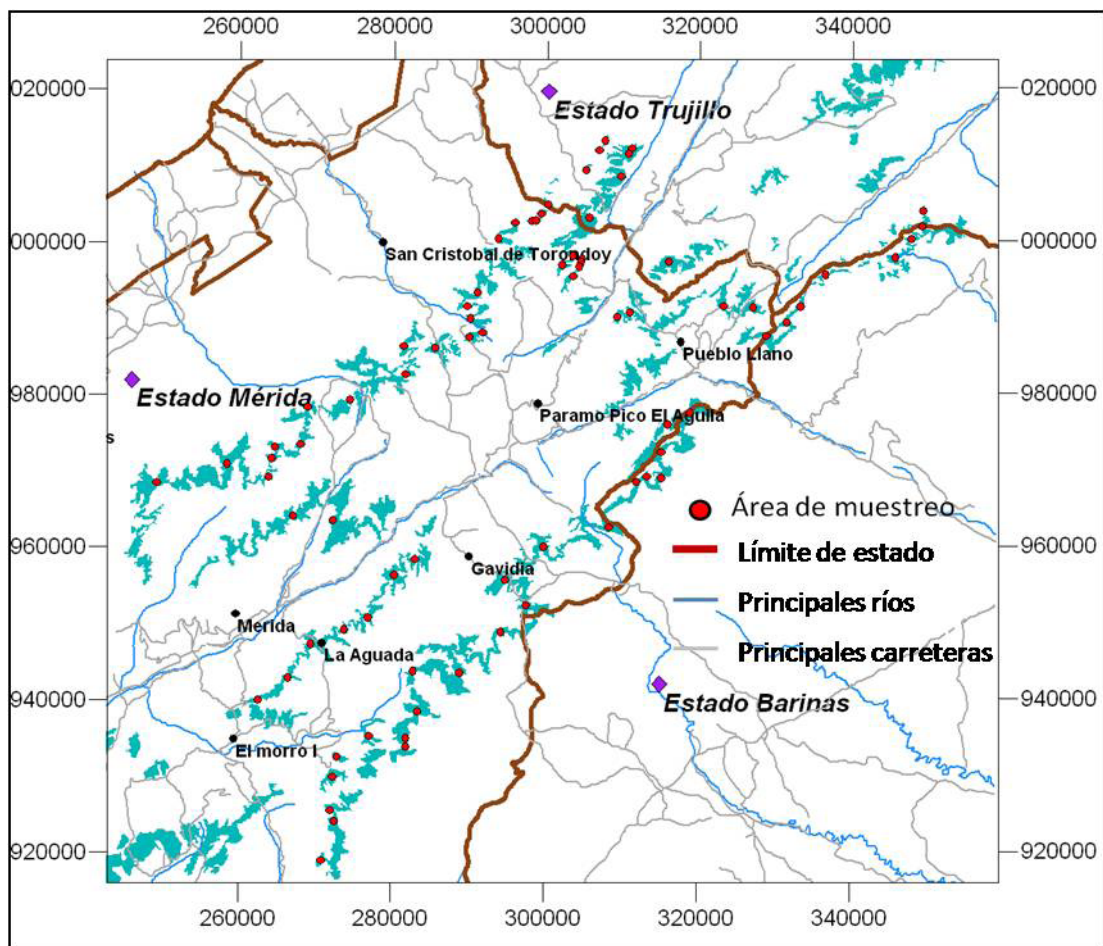
La interpolación de variables ambientales como la precipitación y los índices ombrotérmicos derivados, fue realizada utilizando el método geoestadístico "kriging", el cual es un método tradicional de interpolación de los Sistemas de Información Geográfica (Oliver y Webster, 1990). Diferentes métodos de interpolación estadística son utilizados para crear superficies de distribución climática, entre ellos el Kriging (Hijmans *et al.* 2005). Zhao *et al.* (2006) utilizó este método para

interpolando datos de temperatura y precipitación y determinar superficies climáticas que luego utilizó para determinar la distribución espacial de *Picea crassifolia* en China. Esta herramienta geoestadística también ha sido utilizada para determinar la distribución espacial de especies animales (Miller y Franklin, 2002), dispersión de semillas (Hamann *et al.* 2000) y estimación de biomasa de bosques (Sales *et al.* 2007).

Con ayuda de un sistema de información geográfica (SIG) se extrajeron los valores promedio de todas las variables ambientales de acuerdo al tipo de contacto (selva nublada- bosque paramero, bosque seco-bosque paramero, arbustal xérico-bosque paramero, para el caso de contactos inferiores y bosque paramero-páramo para el contacto superior).

Adicionalmente se extrajeron los valores de los índices ombrotérmicos  $I_o$  e  $I_{od}_2$  descritos por Rivas-Martínez (2004); los cuales evalúan, el grado de humedad en una localidad en función de las temperaturas que presente (Suárez del Moral 2009) estos índices caracterizan la cantidad de precipitaciones totales anuales el primero, y la distribución de dichas precipitaciones el segundo. Toda la información generada en este trabajo tiene sistema de coordenadas UTM, datum WGS 1984, elipsoide WGS84, zona 19 y resolución de pixel 25x25 metros.

En cada área de muestreo se calculó la estadística descriptiva para las siete variables ambientales exceptuando los índices ombrotérmicos, de los cuales se consideró el valor promedio que tomó el índice en cada ventana.



**Figura 2.** Áreas de muestreo seleccionadas dentro núcleo central de Páramos de Los Andes venezolanos. La selección de estas 79 ventanas se realizó sobre el bosque preparamero distribuido a lo largo del continuo de la cordillera; no se tomaron muestreos sobre porciones de la cordillera aisladas entre sí, tal es el caso de San José de Acequias. El criterio de selección se basó en evitar zonas intervenidas y que las mismas estuvieran distribuidas uniformemente a lo largo de la cordillera.

## MODELO ESPACIAL DE DISTRIBUCIÓN DEL ECOTONO BOSQUE-PÁRAMO

**Tabla 1.** Intervalos seleccionados para agrupar los valores de Iod2 en clases según el sistema de clasificación de Rivas-Martínez (2004) para el área de estudio seleccionada correspondiente al núcleo central de Páramos de los Andes venezolanos. No todos los intervalos están incluidos en la clasificación de Rivas –Martínez.

Clase	Valor de Iod2	Ombrotipo según Rivas-Martínez
Pluviestacional subhúmedo	0-1,85	No existe
Pluviestacional húmedo	1,85-2,5	No existe
Pluvial subhúmedo	2,5-5,4	Subhúmedo*
Pluvial húmedo	5,4-8,4	Húmedo*

**Tabla 2.** Valores de estadística descriptiva para las variables ambientales consideradas para los diferentes tipos de contacto del área de estudio seleccionada correspondiente al núcleo central de Páramos de los Andes venezolanos.

Contacto	Bosque preparamero- Páramo	Selva nublada- Bosque preparamero	Bosque seco-Bosque preparamero	Arbustal xérico- Bosque preparamero
<b>Área total muestreada (Km<sup>2</sup>)</b>	6,21	2,67	0,47	0,21
<b>Altitud (m)</b>	3320,87	2951,11	2862,82	2493,00
<b>desvest</b>	210,96	172,08	312,50	176,23
<b>% c.v altitud</b>	6,35	5,83	10,92	7,07
<b>Temp media</b>	8,66	10,72	11,18	13,33
<b>desvest</b>	1,17	0,95	1,78	0,98
<b>% c.v temp media</b>	13,51	8,86	15,91	7,31
<b>Temp maxima</b>	16,37	18,18	18,60	20,48
<b>desvest</b>	1,04	0,85	1,59	0,84
<b>% c.v temp maxima</b>	6,33	4,67	8,58	4,11
<b>Temp minima</b>	2,88	5,08	5,54	7,83
<b>desvest</b>	1,25	1,01	1,94	1,02
<b>% c.v temp minima</b>	43,34	19,97	34,95	12,99
<b>Aspecto</b>	183,72	178,39	172,18	82,33
<b>desvest</b>	82,49	93,97	87,96	19,33
<b>% c.v aspecto</b>	44,90	52,68	51,08	23,47
<b>precipitación</b>	1231,90	1271,02	1098,45	1157,17
<b>desvest</b>	177,35	197,08	151,21	44,38
<b>% c.v precipitacion</b>	14,40	15,51	13,77	3,84
<b>Pendiente Grados</b>	28,43	31,02	31,55	28,33
<b>desvest</b>	6,02	5,94	6,14	7,47
<b>% c.v pendiente</b>	21,19	19,16	19,46	26,38

### Análisis de datos

Se realizaron correlaciones lineales de Pearson entre las variables ambientales como primer paso para evaluar las relaciones entre ellas. Adicional a los análisis de correlación, se realizaron evaluaciones visuales del comportamiento que pudieran presentar todas las variables entre sí. Partiendo de que la visualización es una herramienta que permite esclarecer tendencias se realizaron gráficos de caja para visualizar separaciones entre los grupos de datos y se aplicaron análisis de variancias (ANDEVA) para corroborar las separaciones ( $P < 0,05$ ).

Dado que el gradiente ambiental considerado en el análisis de regresiones unimodales de la presencia y distribución del bosque paramero, en relación con los factores ambientales es muy corto, no se observaron ajustes significativamente estadísticos que permitieran generar modelos de respuesta ecológica continuos o de probabilidad. Por esta razón decidimos extraer, de un análisis multivariado de ordenamiento, las variables estadísticamente significativas que están determinando la presencia y distribución del ecosistema de bosque paramero.

Partiendo de la gran cantidad de información generada se realizó un análisis de ordenamiento multivariado. Para realizar el ordenamiento se generaron dos matrices para cada contacto, una matriz principal con la presencia-ausencia del límite en clases de altitud definidas cada 50 metros a partir del menor valor de ubicación del límite y otra matriz con las variables ambientales señaladas anteriormente.

Partiendo de la naturaleza de los datos, donde se reconoce que la distribución de los límites de contacto del bosque paramero deben estar respondiendo, en márgenes estrechos, a óptimos en las variables consideradas, se seleccionó el análisis canónico de correspondencia (CCA por sus siglas en Inglés), con base en la respuesta unimodal de aparición del límite en función de las variables ambientales a lo largo de gradientes de las mismas variables (Jongman *et al.* 1995). Con esta información se elaboraron modelos de caja o sobre (definidos como “envelope models” en inglés).

### Modelos espaciales de distribución del ecotono

Una vez establecidas cuáles variables ejercen mayor influencia sobre la aparición del límite de acuerdo al ordenamiento realizado, se procedió

a evaluar para cada límite tanto superior como inferior, el comportamiento de las tres variables más importantes.

Existe una gran variedad de modelos para representar la respuesta de la vegetación y especies, los cuales son revisados, analizados y clasificados por Guisan y Zimmermann (2000), donde muestran que los modelos de caja o sobre han sido utilizados para entender la distribución de la vegetación con base en factores ambientales asociados principalmente al clima. El concepto de modelo de caja ha sido considerado en estudios de determinación de hábitat para especies y vegetación, y se han elaborado varios modelos computacionales avanzados con base en este concepto como ENFA (Análisis de factores de nicho ecológico) (Olivier y Wotherspoon, 2005; Soberón y Townsend Peterson, 2005) o BIOCLIM y otros derivados de este (Guisan y Thuiller, 2005). Dada la característica de este tipo de modelos, de estar basados en variables climáticas, son muy apropiados para analizar cambios de la vegetación en escenarios de cambio climático (Hulme 2005). Se realizaron gráficos donde tanto abscisas como ordenadas correspondían a las variables que resultaron importantes para ambos límites. Para el caso del límite inferior se graficaron los valores de pendiente y temperaturas medias de las áreas de muestreo, donde a cada muestreo se le señaló a qué clase de  $Iod_2$  correspondía. Para realizar la evaluación, los valores que tomó el índice ombrotérmico  $Iod_2$  para cada área de muestreo fueron agrupados en clases (Tabla 1).

El agrupamiento en clases se realizó según los criterios de Rivas-Martínez (2004) para clasificar en pluviales y pluviestacionales donde 2,5 es el valor crítico. Para clasificar valores por debajo o por arriba de este umbral se optó por generar una clasificación, que aun cuando no responde a ninguna descrita por Rivas-Martínez (2004), buscó respetar los criterios de húmedo y subhúmedo descritos por el mismo autor. Para el límite superior se repitió el procedimiento pero considerando en los ejes de coordenadas la precipitación y la temperatura mínima.

Una vez graficados se seleccionaron los rangos de las variables entre los cuales se encontraban restringidas las clases del  $Iod_2$ , seleccionando tales rangos a manera de cajas siguiendo el criterio descrito en Suárez del Moral (2009). Se procuró incluir dentro de las cajas la mayor cantidad de puntos de una misma clase, obviando aquellos

## MODELO ESPACIAL DE DISTRIBUCIÓN DEL ECOTONO BOSQUE-PÁRAMO

**Tabla 3.** Correlación de variables en los distintos tipos de contacto del área de estudio seleccionada correspondiente al núcleo central de Páramos de los Andes venezolanos. \*Correlación significativa entre los pares de variables. \*\*\* Correlación altamente significativa.  $P < 0,050$ .

3.a Correlación variables del contacto arbustal xérico-Páramo							
	Altitud	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Exposición	Pendiente Grados	Precipitación
Altitud		-0,998***	-0,997***	-0,998***	0,759	-0,220	0,0373
Temperatura media			0,999***	0,999***	-0,759	0,199	-0,0556
Temperatura máxima				0,997***	-0,744	0,201	0,0780
Temperatura mínima					-0,743	0,209	-0,0174
Exposición						-0,0895	0,109
Pendiente Grados							-0,311
Precipitación							

3.b correlación variables del contacto Bosque siempreverde seco-Páramo N=11							
	Altitud	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Exposición	Pendiente Grados	Precipitación
Altitud		-0,999***	-0,999***	-0,999***	0,251	0,636*	-0,503
Temperatura media			1,000***	1,000***	-0,236	-0,655*	0,518
Temperatura máxima				1,000***	-0,247	-0,655*	0,523
Temperatura mínima					-0,241	-0,648*	0,515
Exposición						-0,0660	-0,198
Pendiente Grados							-0,829*
Precipitación							

3. c Correlación variables del contacto Bosque preparamero-Páramo N=79							
	Altitud	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Exposición	Pendiente Grados	Precipitación
Altitud		-0,998***	-0,998***	-0,998***	0,0631	0,122	0,118
Temperatura media			0,999***	0,999***	-0,0541	-0,128	-0,134
Temperatura máxima				0,999***	-0,0507	-0,130	-0,122
Temperatura mínima					-0,0596	-0,121	-0,127
Exposición						-0,112	-0,242*
Pendiente Grados							-0,224
Precipitación							

3.d Correlación variables del contacto Selva Nublada-Páramo N=62							
	Altitud	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Exposición	Pendiente Grados	Precipitación
Altitud		-0,998***	-0,997***	-0,997***	0,230	-0,154	0,0417
Temperatura media			0,998***	0,999***	-0,234	0,162	-0,0369
Temperatura máxima				0,999***	-0,233	0,149	-0,0343
Temperatura mínima					-0,236	0,157	-0,0389
Exposición						0,0957	-0,0686
Pendiente Grados							0,389*
Precipitación							



puntos que distasen mucho del agrupamiento para minimizar error. Importante resaltar que cada punto si bien expresa el valor que toma el  $Iod_2$ , restringido entre valores de temperatura media, mínima, pendiente y temperatura, representan la ubicación del área de muestreo, en otras palabras, ubicación del límite en función de las variables en cuestión.

Partiendo de los mapas de distribución de las variables, se señalaron en el SIG, a través de un recálculo de mapa, los valores de las variables en cuestión que quedaron restringidos dentro de las cajas señaladas; este nuevo cálculo de mapa permite que el programa delimite espacialmente los lugares donde se cumplen las condiciones enmarcadas por las cajas.

Para validar el modelo se calculó el error de acuerdo al método propuesto por Congalton (1991), utilizando una matriz de error; la cual es el arreglo numérico de números de píxeles asignados al objeto de la evaluación (bosque paramero) de acuerdo al número de píxeles ya reportados para dicho objeto, en este caso el bosque paramero reportado en el MEANC.

#### **Respuesta del modelo a escenarios de cambio climático**

Para generar el modelo de distribución del contacto bosque-páramo en este trabajo se considerará el escenario climático *optimista* que considera el escenario de emisión de gases SRES-B1 con base en los modelos UKTR desarrollado por la United Kingdom Meteorological Office (UKMO) y el CCC-EQ del Canadian Center for Climate Modelling and Análisis (CCCMA).

Estos modelos simulan el cambio promedio de temperatura y precipitación para lapsos de 30 años y a su vez fueron utilizados por la comisión encargada de la primera comunicación de cambio climático en Venezuela (MARN 2005) para generar predicciones climáticas para el país.

A partir de los mapas de distribución de temperaturas y de precipitación, se generó la información necesaria para modelar el bosque paramero bajo el escenario de emisión de gas SRES-B1 optimista; pero ante diferentes concepciones, la canadiense (CCCMA) y la británica (UKTR-UKMO). Los estudios realizados por los canadienses predicen bajo el escenario optimista un aumento en la temperatura de 0,4 °C y una disminución de las precipitaciones en aproximadamente 350 mm para el núcleo de Los Andes; mientras que los ingleses predicen un aumento de 0,7 °C y ninguna variación en las precipitaciones para el núcleo central de Los Andes.

Al mapa de temperaturas medias y mínimas, temperaturas que resultaron variables de mayor importancia en el multivariado, se les sumó el aumento respectivo según canadienses y británicos. Al mapa de distribución de las precipitaciones se le restó la disminución prevista de las precipitaciones.

Se recalculó el mapa de patrón de distribución actual del bosque paramero, pero introduciendo los mapas de temperatura y precipitación modificados en escenario de cambio climático como información base. Igualmente para una mejor visualización de las variaciones entre el modelo potencial y los modelos en escenarios de cambio se cruzaron ambos mapas.

## **RESULTADOS**

#### **Representatividad de las Unidades de muestreo**

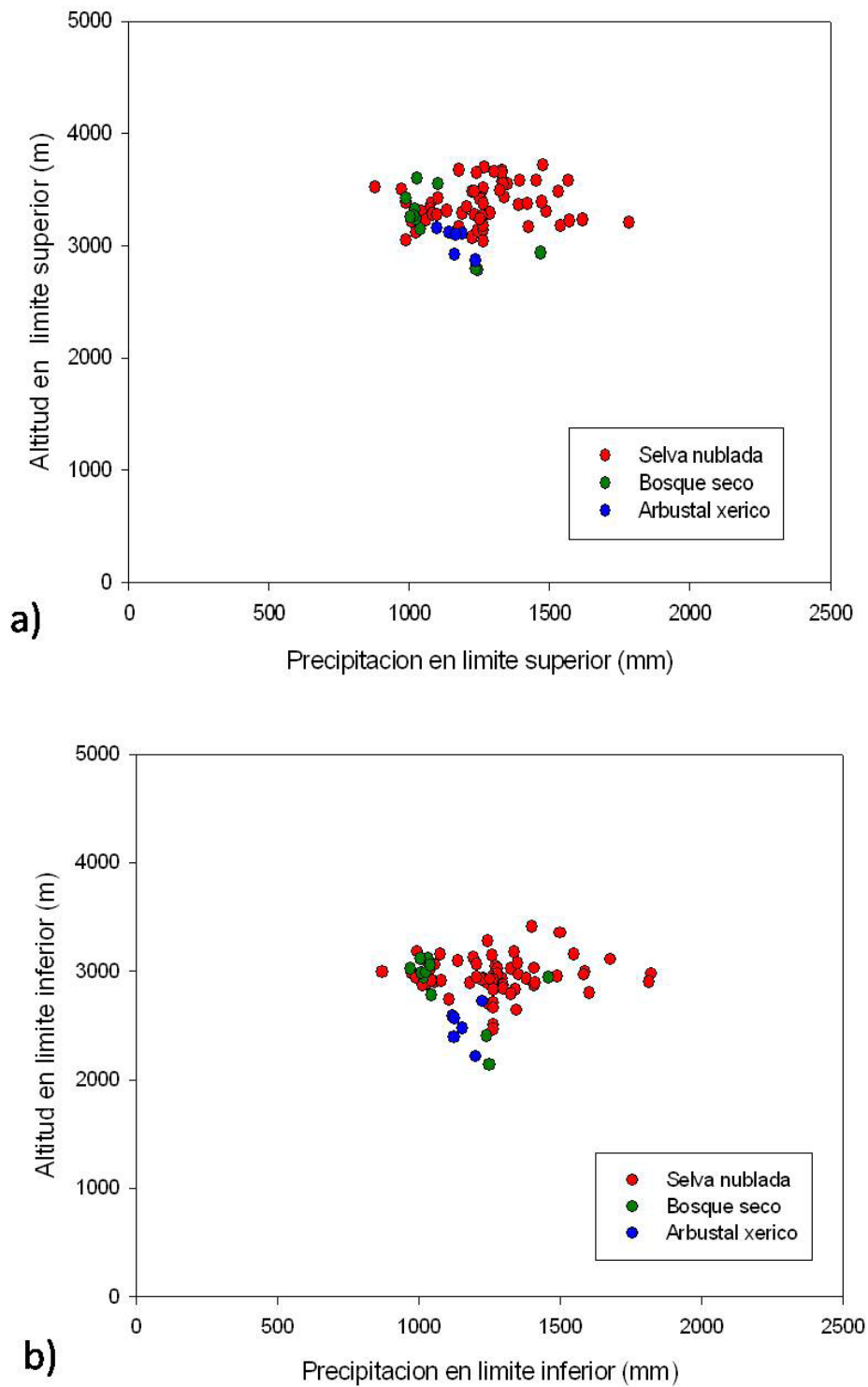
De las 79 ventanas seleccionadas, se tienen 79 del contacto bosque paramero-páramo como contacto superior, 62 ventanas de contacto selva nublada-bosque paramero, 11 ventanas de contacto bosque siempreverde seco-bosque paramero y seis ventanas de contacto arbustal xérico-bosque paramero. En total 158. Este último contacto con el arbustal xérico resultó ser inesperado, sólo fue en áreas muy reducidas pero igual se consideró en la evaluación.

El área de muestreo representó un 1,21% del total del bosque paramero. Si se considera que el total del bosque en MEANC considera el espesor de la franja del bosque, islas de bosque (ej. Pueblos del Sur) y áreas de bosque adyacentes a zonas intervenidas; situaciones todas no consideradas en este trabajo, se tiene que el área de muestreo es bastante representativa para tratarse de un bosque.

#### **Relaciones de las variables ambientales y el ecotono**

En la tabla 2 se muestra la información obtenida para cada tipo de contacto. Además de valores promedios para cada variable se calculó el coeficiente de variación (CV) como medida que permitiera realizar comparaciones entre la variabilidad de todos los datos, aun cuando las unidades utilizadas no sean las mismas. En la tabla 3 se muestran los coeficientes de las 84 correlaciones lineales obtenidas entre las variables ambientales para cada tipo de contacto (3a, 3b, 3c y 3d).

La evaluación de correlación de Pearson realizada a las variables sólo arrojó ser significativa entre la ubicación altitudinal del límite de contacto y las temperaturas con  $P < 0,0001$ ; evidenciando



**Figura 3.** Relación entre la altitud y la precipitación para las áreas de muestreo seleccionadas dentro núcleo central de Páramos de Los Andes venezolanos: a) Altitud de ventanas de muestreo y precipitaciones en contacto superior. b) Altitud de ventanas de muestreo y precipitaciones en contacto Inferior. Se logra observar para ambos cierta separación entre contactos.

la regresión altotérmica adiabática. Para las demás variables que arrojaron significancia en la correlación lineal, se tiene que el valor de  $r$  está fuera de los límites que para este trabajo se consideraron de restricción (-0,85 y 0,85).

Reconociendo como fundamental teórico que la precipitación debe ser un factor importante, tal como lo señala Monasterio (1980) al exponer que para el caso de las vertientes húmedas el bosque paramero alcanza mayores elevaciones que en las vertientes secas, se evaluaron con más detalle los gráficos de dispersión de la ubicación del límite y las precipitaciones (Figura 3).

En esta figura no se observaron tendencias claras, mas sí rangos de valores entre los que parece estar restringido el tipo de contacto, evidenciándose que el contacto tanto inferior como superior que involucra a la selva nublada presenta mayores rangos de dispersión en cuanto a las precipitaciones, alcanzando mayores elevaciones igualmente para ambos contactos. Le sigue el bosque seco y por último el arbustal xérico.

Se encontró que aun cuando no hay diferencias o tendencias claras en la ubicación altitudinal sí se observa una muy clara separación de los valores cuando se considera la ubicación relativa de las ventanas de muestreo externas a la cordillera, orientadas hacia Los Llanos (Figura 4).

En la figura 5 se presentan los diagramas de caja para los muestreos clasificados según su ubicación relativa y se encontró que las ubicaciones en la vertiente llanera presentan mayores valores de precipitación tanto en límite inferior como superior, mientras que las demás ubicaciones no presentaron diferencias (5a). Al evaluar la ubicación altitudinal se obtuvo que las diferencias se encuentran en el límite inferior para todas las ubicaciones salvo para las ubicaciones de vertiente llanera, y para el límite superior no hay diferencias (5b).

El CCA realizado arrojó ser significativo en el primer eje para ambos contactos tanto superior como inferior ( $P < 0,05$ ). Se obtuvo igualmente el orden de importancia de las variables involucradas en el ordenamiento; tales variables fueron: temperaturas medias, máximas y mínimas, precipitación, pendientes y estacionalidad definida por el  $Iod_2$ .

Observando el ordenamiento (Figura 6) se tiene que para el contacto superior se observa que el primer eje absorbe 46,5% de la variabilidad y se encuentra asociado al gradiente altotérmico (Figura 6a). El segundo eje absorbe 18,1% de variabilidad

y se encuentra asociado a la disponibilidad hídrica. Entre los dos ejes absorben un total de 64,6 % de la variabilidad total.

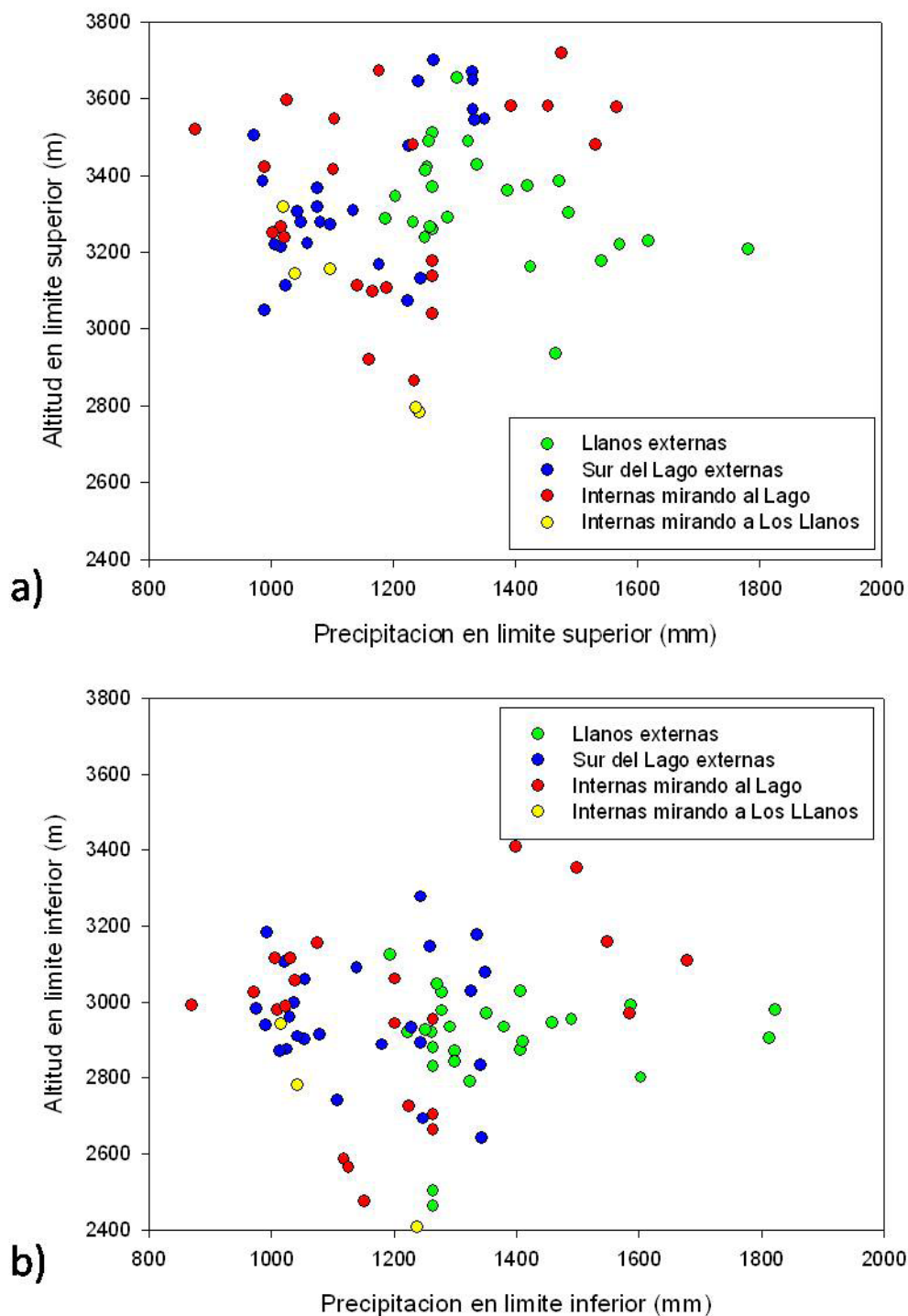
Evaluando el orden de importancia de las tres primeras variables se obtuvo que la temperatura mínima ocupa el primer lugar, la temperatura media el segundo y la precipitación el tercero. Sin embargo, dado que las temperaturas son consideradas como covariables, se descartó la media en el orden y se estableció el siguiente orden: la temperatura mínima en primer lugar, la precipitación en segundo lugar y el  $Iod_2$  en tercero.

En el contacto inferior (Figura 6b) el primer eje absorbe 47,8 % de la variabilidad y se encuentra asociado al gradiente altotérmico; el segundo eje absorbe 19,5% de la variabilidad y se encuentra también asociado a la disponibilidad hídrica absorbiendo entre los dos ejes 67,3% de variabilidad total. El orden de importancia de las variables presenta, con respecto a las temperaturas, la misma situación de covariación de temperaturas señalada para el contacto superior pero en este caso el orden resulta: temperatura media en primer lugar,  $Iod_2$  en segundo y pendiente en tercero.

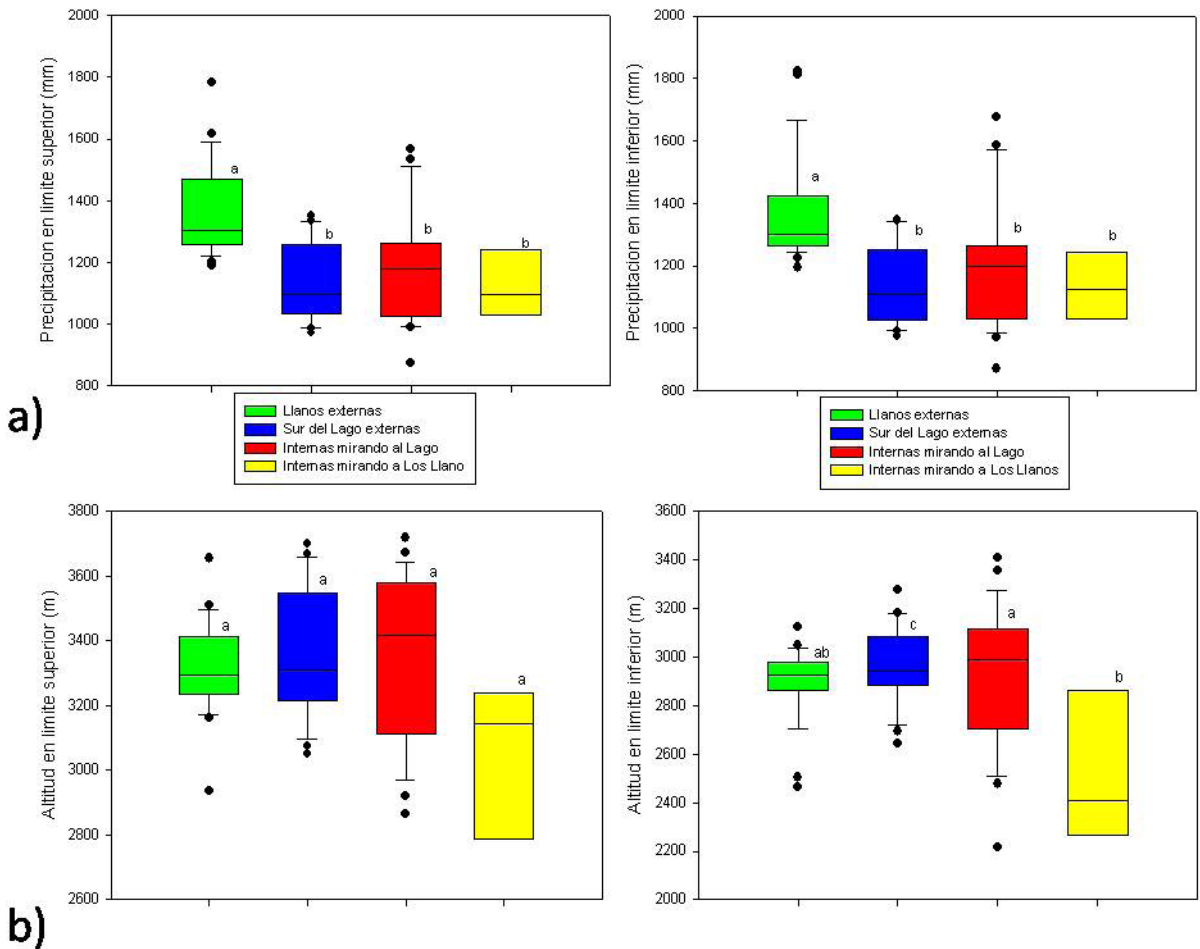
### Modelo de distribución espacial del bosque preparamero

A partir de la evaluación visual cualitativa de las variables más importantes asociadas al límite evidenciadas en los ordenamientos multivariados, se obtuvo que para el caso del límite superior existe una marcada variabilidad en torno a las temperaturas y la precipitación, sin embargo fue posible separar los cuatro grupos de estacionalidades en cajas de varios tamaños y superpuestas entre sí. En cuanto al límite inferior, la dispersión en torno a las variables es menor, particularmente para las temperaturas medias. De igual manera se pudieron seleccionar las cuatro cajas correspondientes a los grupos de estacionalidad.

El modelo resultante de la distribución potencial de la vegetación de bosque paramero (Figura 7) abarca un área total de 1866,44 Km<sup>2</sup>, de los cuales 444,16 Km<sup>2</sup> coinciden con el MEANC de Josse *et al.* (2009b) y al evaluarlo a través de la matriz de error, presentó una precisión de modelización de 57,4%. El análisis de error (Tabla 4) también arrojó una precisión general de 96% y fiabilidad de 24%. El cuadrado rojo señala la ubicación de Tuñame con grandes extensiones de bosque paramero en sus alrededores.



**Figura 4.** Ubicación altitudinal de ventanas de muestreo seleccionadas dentro núcleo central de Páramos de Los Andes venezolanos discriminadas por su localización geográfica: (a) en el contacto superior y (b) contacto inferior en relación con la precipitación respectiva según su ubicación relativa.



**Figura 5.** Gráficos de caja para muestreos seleccionados dentro núcleo central de Páramos de Los Andes venezolanos discriminados según su ubicación relativa para: a) Precipitaciones en el límite superior y límite inferior, y b) Altitud de ubicación del bosque preparamero en límite superior y límite inferior.

### Modelos de distribución potencial del bosque preparamero en escenarios de cambio climático

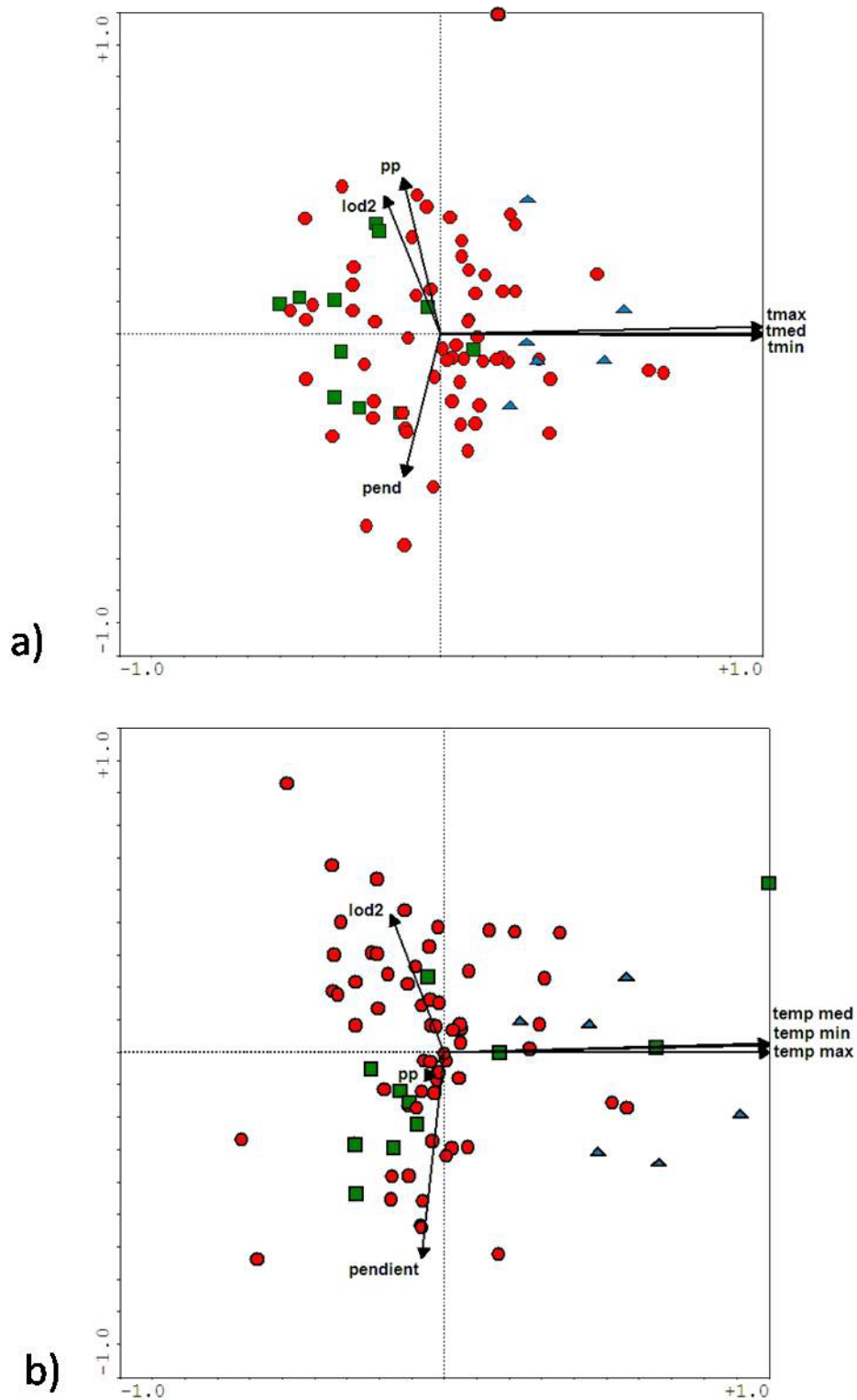
Los mapas de distribución potencial del bosque paramero en escenarios de cambio climático y su respectiva comparación con el modelo de distribución potencial arrojaron diferencias notables.

Se observa que el modelo en escenario canadiense (Figura 8) predice mayores impactos en la distribución del bosque paramero, con una mayor fragmentación en el continuo del bosque alrededor de la cordillera. Llama la atención que a simple vista pareciera que el límite ubicado hacia Los Llanos presentara mayor grosor que las ubicaciones hacia el Sur del Lago. El escenario del modelo británico, en cambio, presenta menores impactos en la distribución del bosque (Figura 9).

### DISCUSION

#### La distribución del bosque preparamero

En relación con la distribución del bosque paramero y los factores que puedan estar influyendo encontramos una gran gama de condiciones bajo las cuales se presenta el bosque paramero, lo que dificulta atribuirle de manera estricta características ambientales bajo las cuales se desarrolla. Sin embargo, es posible señalar patrones o tendencias en cuanto la asociación que existe entre la distribución de ciertas variables y la ubicación del límite altitudinal del bosque preparamero. El más resaltante, y quizás el único que se esperaba aflorara desde un principio, es la relación entre la ubicación del límite y la temperatura, donde esta última viene dada por el gradiente altotérmico.



**Figura 6.** Ordenamiento de los muestreos seleccionados dentro del núcleo central de Páramos de Los Andes venezolanos y correlación de factores ambientales con los ejes de ordenamiento: a) Primer y segundo eje de ordenamiento del límite superior. b) Primer y segundo eje de ordenamiento del límite inferior. Los círculos son los contactos superiores con contacto inferior de selva nublada, los cuadrados contactos con el bosque seco y los triángulos con el arbustal xérico. Nótese como la estacionalidad (Iod2) está asociada al segundo eje.

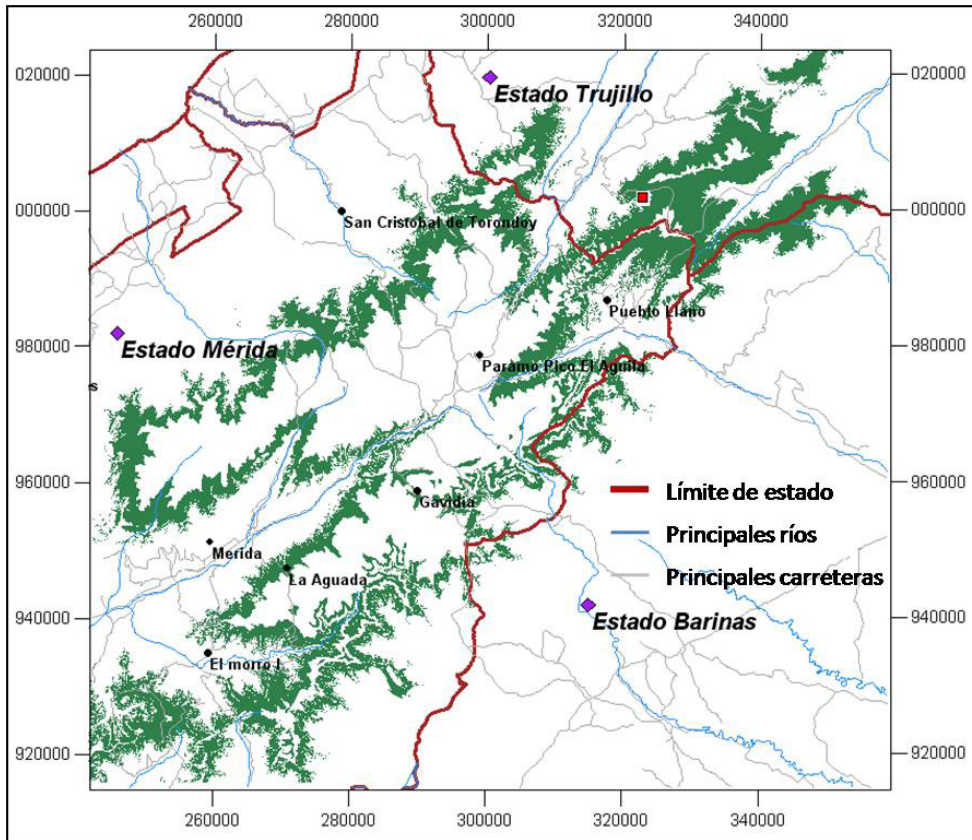


Figura 7. Modelo de distribución potencial del bosque preparamero en el núcleo central de Los Andes.

Otro aspecto observado en esta relación es la separación de las vertientes, en particular de las vertientes llaneras, del resto del grupo. Evaluando luego en detalle a qué obedece tal separación, hay indicios que es debido a la estacionalidad que presentan.

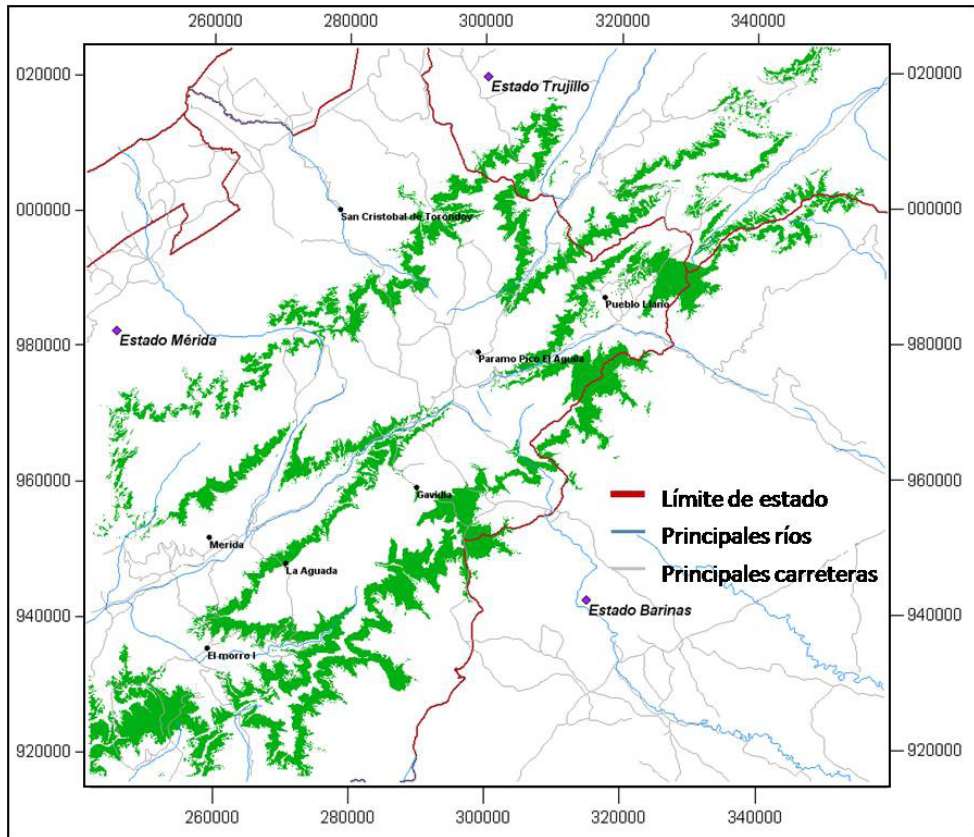
Cuando se observan los patrones de distribución en los tres tipos de contactos del bosque preparamero con los ecosistemas inferiores, encontramos que es igual, pero esos contactos difieren en altitud y el único grupo que difiere en precipitación no presenta diferencias significativas en la altitud. Esto nos hace ver la existencia de otro factor que pudiera estar asociado a las precipitaciones y que esté generando tal separación.

Es aquí donde surge la diferencia en el ritmo y distribución de las precipitaciones. Al evaluar los ordenamientos se evidencia asociación al segundo eje de las precipitaciones y las pendientes lo que pudiera estar sugiriendo un gradiente de disponibilidad hídrica aunado a la estacionalidad. Se plantea que si bien el ritmo de las precipitaciones o estacionalidad de las mismas determinan los períodos de sequía, el drenaje del suelo pudiera

estar actuando como factor amortiguador de tales períodos de sequía para la vegetación. Este drenaje está asociado directamente a las pendientes, donde mayores pendientes favorecen la escorrentía, limitando la disponibilidad de agua en el suelo para la vegetación en períodos de sequía; caso contrario ocurrirá entonces donde se presenten menores pendientes y la escorrentía sea menor favoreciendo la acumulación de agua en suelo.

Este fenómeno en particular ocurre para el límite superior, donde los vectores de las precipitaciones y las pendientes son opuestos. Para el caso del límite inferior tienen la misma dirección, pero si se evalúa el primer y tercer eje de ordenamiento se observa que son opuestos, esto debido a que es la estacionalidad la que está asociada al segundo eje y además está desplazando a las precipitaciones en importancia.

El orden de importancia de las variables para los contactos superior e inferior, de acuerdo al análisis de ordenamiento, señaló qué parámetros considerar para la generación del modelo. Para el caso del límite superior resultaron ser la temperatura



**Figura 8.** Modelo de distribución potencial del bosque preparamero en el núcleo central de Los Andes en el escenario optimista de cambio climático (CCC-EQ) del Canadian Center for Climate Modelling and Análisis (CCCMA) (modelo canadiense). El escenario es de aumento de la temperatura en 0,4 °C con disminución en las precipitaciones en 350 mm anuales.

mínima en primer lugar, la precipitación en segundo y la estacionalidad de tercero.

Para este límite resultó coherente que sean precisamente las temperaturas mínimas las que sean más importantes en explicar la variabilidad del límite. Estas temperaturas mínimas van a determinar precisamente en qué medida ocurre daño a tejidos propios de plantas leñosas pero que a su vez representan óptimos de crecimiento para vegetación herbácea y arrosada propia de ecosistemas parameros.

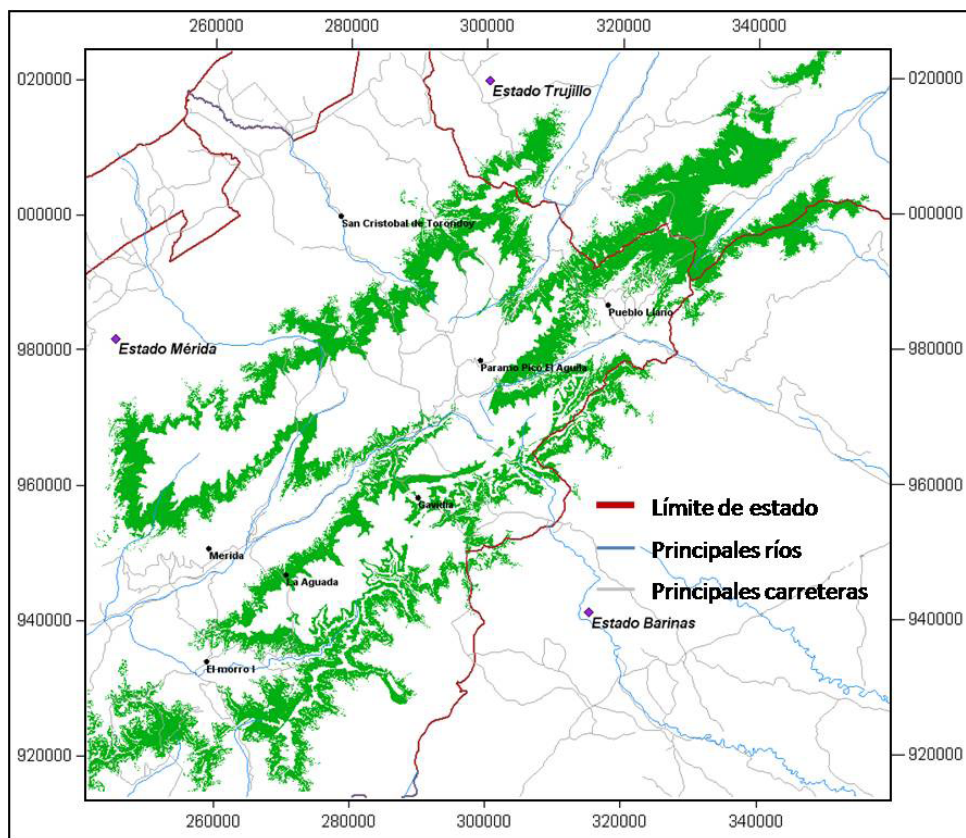
A su vez estas temperaturas mínimas estarían siendo afectadas por la disponibilidad de agua ya comentada, donde mayor contenido de agua en atmósfera y hasta en suelo, determinan menores pérdidas de temperaturas por la misma capacidad calórica del agua que la hace retener el calor y por ende mayores temperaturas mínimas.

Para el contacto inferior en el orden de importancia de variables resultó ser primera la temperatura

media, segunda la estacionalidad dada por el  $Iod_2$  y tercera la pendiente. La estacionalidad y el hecho de que la misma conduce a respuestas ecológicas diferentes que los montos totales de precipitación, cobra particular importancia si se considera que en los ordenamientos multivariados realizados, la estacionalidad definida por el  $Iod_2$  es la segunda y tercera variable en importancia para los límites inferior y superior respectivamente.

Si bien la temperatura media está explicando una buena parte de la distribución del límite bosque-páramo, al estar fuertemente asociada al primer eje, la disponibilidad de agua a lo largo del año, representada por el  $Iod_2$  parece ser la variable que está determinando con más fuerza la distribución del límite inferior del bosque paramero, asociado a la baja disponibilidad de agua durante el período seco de la estacionalidad. La pendiente también juega un papel importante en el ordenamiento del límite inferior, asociada precisamente a





**Figura 9.** Modelo de distribución potencial del bosque paramero en el núcleo central de Los Andes en el escenario optimista de cambio climático (UKTR) desarrollado por la United Kingdom Meteorological Office (UKMO) (escenario británico). El escenario es de aumento de la temperatura en 0,7 °C sin variaciones en la precipitación.

la disponibilidad de agua, donde a mayores pendientes se encontró que el  $Iod_2$  disminuye.

Es evidente que al ser más pronunciadas las pendientes mayor será la escorrentía y menor la disponibilidad de agua para la vegetación, viéndose favorecida la disminución de las temperaturas en el suelo, que bien pueden conducir al daño parcial o atrofia de raíces (Körner y Paulsen 2004) como una de las posibles causas de aparición del límite: bajas temperaturas en suelo que afectan las raíces.

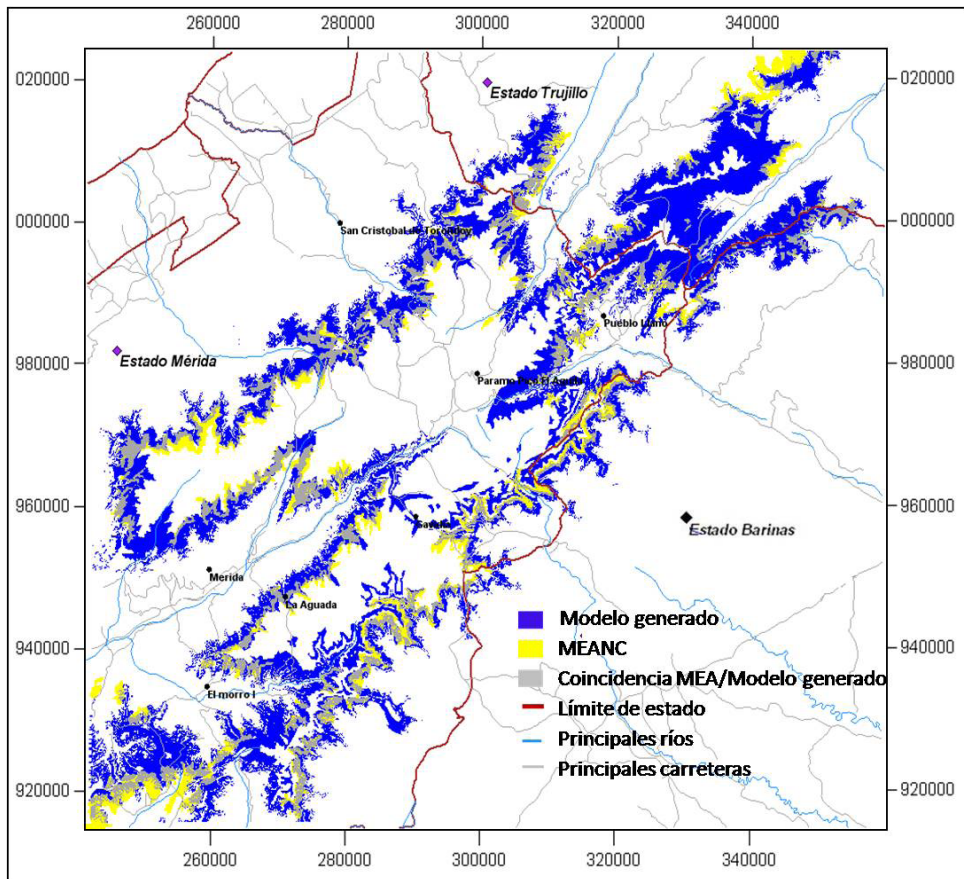
La precipitación, resultó ser la segunda variable en importancia seguida del  $Iod_2$ , lo que genera una especie de círculo en torno al cual pareciera posible explicar la presencia del límite: la disponibilidad hídrica como elemento regulador de las temperaturas.

Aunque estas afirmaciones no son concluyentes, apoyan las investigaciones realizadas en este aspecto, donde a nivel global la variabilidad de condiciones en las que aparece el límite o

“*treeline*” tanto en ubicaciones tropicales como extratropicales son numerosas y ha resultado sumamente complicado el poder establecer comparaciones entre límites de latitudes tan contrastantes. Lo que si señalan estos estudios es que las temperaturas en suelo de dichas ubicaciones son en promedio de 6 a 7 °C (Körner y Paulsen 2004), apoyando de nuevo que es probablemente por debajo de estas temperaturas que el daño y atrofia a las estructuras vegetales comienza.

### Modelo de distribución potencial del bosque paramero

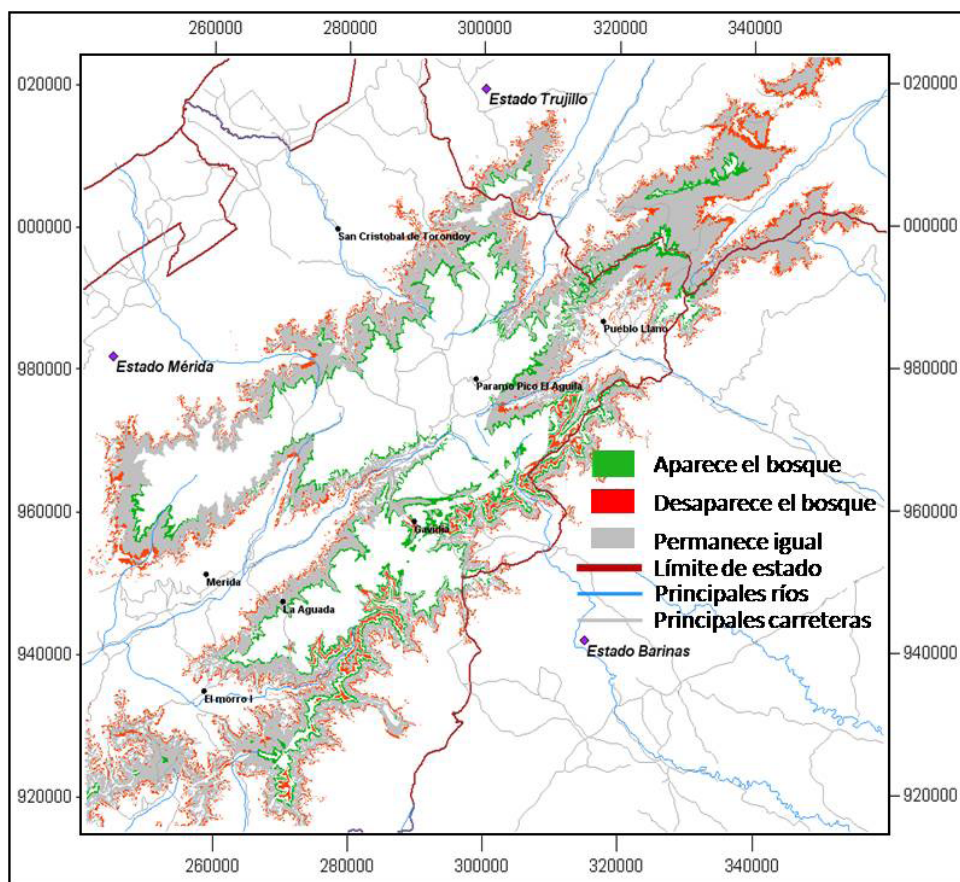
Evaluando el modelo generado del bosque paramero con el mapa de ecosistemas de Los Andes (MEANC) (Figura 10), se observa que aunque haya una elevada precisión de la modelización (57,4%), la fiabilidad es baja (24%). La precisión de la modelización señala que la probabilidad de que un pixel correspondiente al bosque paramero



**Figura 10.** Relación entre el modelo de distribución potencial del bosque preparamero en el núcleo central de Los Andes y la distribución del bosque preparamero según el Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro (MEANC, Josse *et al.* 2009). Se observa la distribución del bosque predicha por el modelo, la distribución del bosque según el mapa de ecosistemas y las regiones de bosque que coinciden para ambos trabajos.

se encuentre en el modelo es de 57,4%; mientras que la fiabilidad o probabilidad de que un pixel clasificado como bosque paramero en el modelo sea efectivamente bosque paramero es de 24%. Dicho de otra forma, el modelo “sobrestima” la distribución del bosque. Resaltando que para las localidades limítrofes entre los estados Mérida y Trujillo y localidades hacia los Pueblos del Sur el modelo abarque extensas áreas de bosque paramero. Igualmente es de hacer notar la continuidad del bosque que se observa en el modelo y que se ve interrumpida, hacia Los Llanos, no en su distribución “horizontal” sino mas bien en su distribución “vertical”, con la presencia de vacíos de bosque dentro de la gran franja que lo define. El modelo de distribución del bosque fue generado a partir de variables climáticas y de la asociación de estas con la distribución del ecosistema de transición hacia el Páramo. Este modelo no

considera disturbios por intervención, tasas de cambio debido a ellos, ni su magnitud; de allí que no se descarta que el modelo esté representando áreas de ubicación del bosque paramero antes de haber sido objeto de tal intervención. Las áreas intervenidas para el caso del MEANC, eran detectadas durante la clasificación de la imagen en el proceso de generación del mapa y fueron excluidas y consideradas como: “áreas intervenidas”; de allí que se encuentre menor área de distribución del mencionado bosque. La discontinuidad en el borde observada en el MEANC puede evidenciar este hecho, tal es el caso de las ubicaciones hacia Tuñame, norte de Pueblo Llano, en el estado Trujillo, donde el modelo predice grandes áreas de bosque paramero y el MEA reconoce grandes áreas intervenidas. Por otra parte, es necesario considerar los errores que pudieron tomar parte en la generación del



**Figura 11.** Relación entre el modelo de distribución potencial del bosque paramero en el núcleo central de Los Andes y el modelo de distribución potencial del bosque paramero en el núcleo central de Los Andes en el escenario *optimista* de cambio climático (UKTR) desarrollado por la United Kingdom Meteorological Office (UKMO) (escenario británico).

modelo. Resaltan en primer lugar la generación de los mapas de distribución de las variables climáticas, donde errores detectados durante la fase de depuración de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas, apuntan a que pudieran existir incongruencias que, aun luego de la depuración y revisión, hayan sido pasadas por alto.

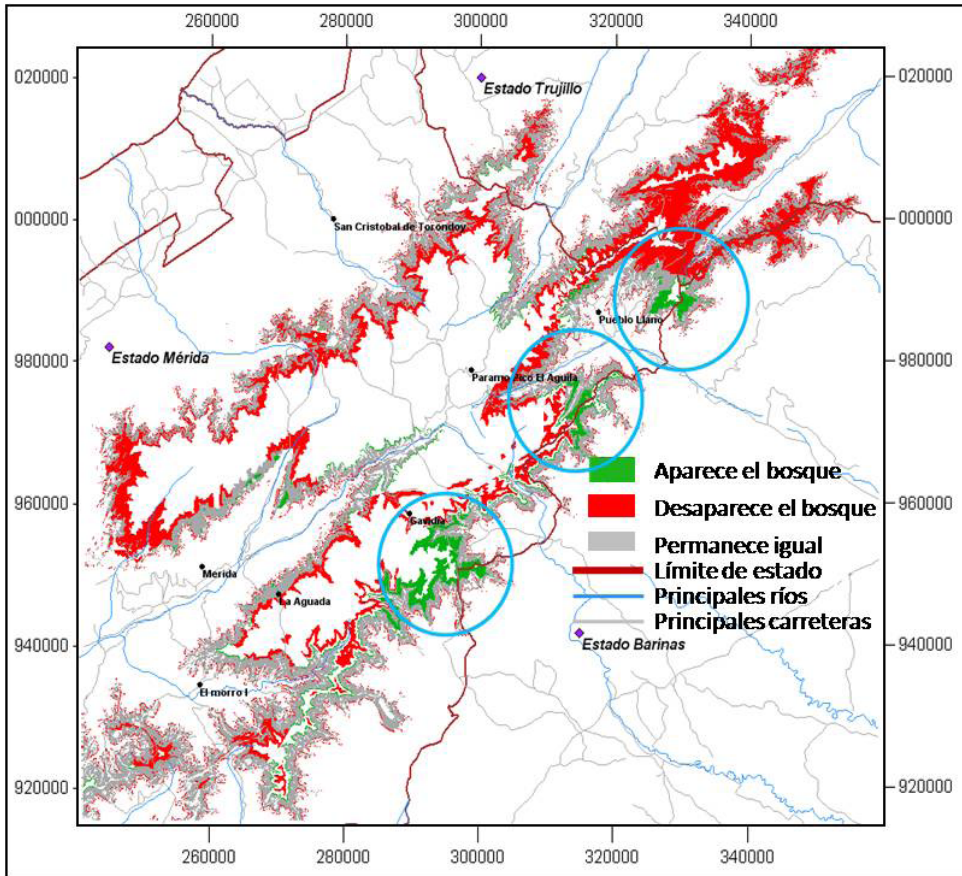
Otra fuente de error pudo provenir de la definición o acotamiento de las “cajas” con la información necesaria para la generación de los modelos. En cuanto a errores externos a la realización del trabajo, es poco lo que se puede sugerir, ya que se está comparando con el MEANC y este mapa debe contar también con cierto margen de errores en su generación.

Se puede reconocer que el modelo generado respondió verdaderamente a la selección de variables climáticas y a los rangos establecidos en la evaluación de los modelos de caja, de no haber sido así, se hubiese obtenido una distribución

aleatoria del bosque paramero y una coincidencia con el MEANC sumamente baja.

### Mapas de distribución potencial del bosque paramero en escenarios de cambio climático

Uno de los aspectos más relevantes observados en los modelos bajo escenario de cambio climático generados, es el impacto que parece tener las precipitaciones. Evaluando el modelo del UKMO, donde el aumento de la temperatura es mayor que en el escenario canadiense, se evidencia que las variaciones en el límite son básicamente el desplazamiento hacia mayores elevaciones, desplazamiento que de acuerdo a la regresión altotérmica debería ser de 116 metros pero que evaluando en el mapa generado varía entre 200 y 250 metros de desplazamiento. Este desplazamiento generaría la pérdida del 7% del bosque paramero modelado en este trabajo (Figura 11).



**Figura 12.** Relación entre el modelo de distribución potencial del bosque preparamero en el núcleo central de Los Andes y el modelo de distribución potencial del bosque preparamero en el núcleo central de Los Andes en el escenario *optimista* de cambio climático (CCC-EQ) del Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (CCCMA) (modelo canadiense).

El modelo canadiense, aun cuando representa un aumento menor de la temperatura, generaría la pérdida del 36% del bosque paramero debido a la disminución de las precipitaciones (Figura 12). Nótese que el modelo predice desplazamiento del bosque hacia mayores elevaciones con desaparición de áreas hacia el límite superior. Obsérvense las zonas en círculos donde hay aparición de bosque brindando la sensación de ser más gruesa la franja. Comparando ambos modelos, el generado bajo condiciones actuales y el generado bajo escenarios de cambio canadiense, se observa que el aparente mayor grosor en la franja de bosque hacia Los Llanos se debe a la aparición de bosque en tres zonas específicas.

Evaluando estas zonas, se tiene que predominan las pendientes menores a los 25°; lo que se pudiera traducir en una mayor disponibilidad hídrica, en caso de efectivamente verse el bosque sometido al cambio en la disminución de las

precipitaciones. Este fenómeno puede explicarse al considerar la disponibilidad de agua y su capacidad para amortiguar los cambios de temperatura, específicamente evitando temperaturas muy bajas, lo que actuaría directamente sobre la distribución del bosque paramero, recordando que para el límite superior las precipitaciones ocuparon el segundo lugar en importancia en los ordenamientos.

Este orden de importancia conduce a suponer que debido a que para el límite superior las precipitaciones son más importantes, y ante la disminución de las mismas se generarían condiciones de sequía y menores temperaturas, no habría avance de la vegetación arbórea. De allí que no se observe en el escenario canadiense “aparición” de bosque paramero a mayores elevaciones, sino un avance del páramo.

Este escenario canadiense señala que los límites superior e inferior del bosque paramero se verían afectados de distinta forma. En el límite superior se evidencia un retroceso del bosque paramero,

mientras que en el límite inferior no se observa mayor desplazamiento. Este fenómeno conllevaría a que la biodiversidad del límite superior se vería mucho más comprometida que la del límite inferior en un escenario de cambio.

Los resultados obtenidos por Santaella (2007), señalan que ha existido variación en el área ocupada por bosque paramero y selva nublada, con incorporación de bosque paramero a áreas de selva nublada, señalando que este bosque se ha transformado en selva nublada en el transcurso de casi 50 años sin que haya variaciones en el área ocupada por páramo; lo que contradice la idea de que el desplazamiento altitudinal de la vegetación ocurre en todos los pisos de vegetación involucrados, tal como lo señala el escenario británico.

Este resultado es comparable con el resultado obtenido en el escenario canadiense, donde no existe disminución de páramo ante el cambio climático y relativamente poco cambio del bosque en el límite inferior. Esto pudiera estar sugiriendo que no hay un verdadero desplazamiento, sino más bien una transformación y desarrollo de un ecosistema en otro. Tal sería el caso del bosque paramero al transformarse en selva nublada al adquirir un mayor desarrollo en su estructura, en su estratificación y especialmente en el desarrollo del elemento leñoso, así como la incorporación de elementos propios de la selva nublada ante condiciones más benévolas para su establecimiento. En este sentido se pudiera encontrar que ante las variaciones atmosféricas que surgen como consecuencia del cambio climático, particularmente del aumento del CO<sub>2</sub>, se vería favorecido el desarrollo del tejido leñoso en la vegetación achaparrada del bosque paramero.

Evaluando de manera general el modelo generado resalta el hecho de que hacia la vertiente llanera la franja de bosque parece presentar mayores interrupciones que hacia la vertiente lacustre. Estas interrupciones, al comparar con los modelos generados bajo escenario de cambio climático y mapas de distribución de variables involucradas, se encontró que parecen deberse en primer lugar a las pendientes, señalando que existe mayor variabilidad de esta característica topográfica hacia Los Llanos que hacia el Sur del Lago.

Esto surge debido a que para la generación de los escenarios, las variables que se modificaron fueron la temperatura y la precipitación y aun así las interrupciones fueron evidentes. Sin embargo no se descarta que no sea una sola variable la que esté jugando papel en este fenómeno; la precipitación pudiera estar tomando parte.

Analizando el modelo en escenario canadiense, escenario que involucra disminuciones en la precipitación, se observa que el límite hacia la vertiente llanera deja de presentar interrupciones, no obstante no llega a ser tan uniforme como el límite hacia el Sur del Lago, apoyando la idea de que las pendientes tienen mayor peso en la distribución del bosque.

En el mismo orden de ideas, llama la atención que hacia las zonas consideradas como xéricas, Mucuchíes y en particular las zonas aledañas hacia el Morro, se presenta un patrón de distribución mucho más “moteado” en relación a demás zonas. Este patrón se mantiene en el escenario británico y se suaviza considerablemente en el escenario canadiense, señalando que se debe principalmente a los valores de precipitación de la zona y a la variabilidad que pueden presentar en áreas relativamente pequeñas.

No se descarta que ambos fenómenos al estar restringidos a la vertiente llanera con un patrón de distribución de precipitaciones pluviestacionales, estén asociados a este régimen hídrico.

### Consideraciones finales

La amenaza de cambio climático y el delicado equilibrio que existe en un ecosistema, en particular en uno de transición como el bosque paramero, justifican su investigación. En este sentido el modelo generado es buena aproximación de lo que pudiese ocurrir bajo cambios en las condiciones climáticas en las que ocurre el bosque paramero, entendiendo que la ocurrencia del mismo está determinada por la existencia de condiciones favorables para su establecimiento y desarrollo, condiciones que serían las principales afectadas al ocurrir un cambio climático.

Es importante acotar que el modelo generado muestra un continuo de bosque alrededor de la cordillera andina que representa un corredor natural hipotético para el mantenimiento de la biodiversidad, del cual vale preguntarse de haber existido efectivamente de esa forma, antes de que la actividad humana entrara a jugar parte, ¿a cuántas especies albergó?, ¿Cuántas se encuentran hoy en día en peligro de extinción? ¿Cuántas más lo estarán bajo escenarios de cambio climático?

Apartando los escenarios, el modelo que se ha generado en este trabajo de la distribución potencial del bosque paramero, pudiera tener usos en el área de evaluación de impacto humano sobre el ecosistema. Puede ayudar a responder interrogantes como, cuánto del bosque paramero ha sido perdido por intervención, cuánto de ese

bosque se puede perder por año o década, según las tasas de cambio que se pudieran detectar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento otorgado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CDCHT-ULA) a través del proyecto C-1591-08-01-F y por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) a través del proyecto LEAF CRNII 005.

## LITERATURA CITADA

- AANDRESSEN, R; PONTE, R. 1973. Estudio integral de las cuencas de los Ríos Chama y Capazón. Universidad de Los Andes Facultad de Ciencias Forestales, Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales. Mérida Venezuela.
- ARZAC, A. 2008. Distribución espacial de formas de vida de plantas en un gradiente altotérmico en Los Andes venezolanos. Trabajo Especial de Grado. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas. Departamento de biología. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- ATAROFF, M. y SARMIENTO, L. 2004. Las Unidades Ecológicas de los Andes de Venezuela. En: La Marca, E. y Soriano, P. (Ed): Reptiles de los Andes de Venezuela. BIOGEOS. Venezuela. 11-26 pp.
- BRUBAKER, L., 1986. Responses of tree populations to climatic change. *Vegetatio* 67: 119-130.
- CAMARERO, J. y GUTIÉRREZ, E., 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change* 63: 181–200.
- CONGALTON, R. 1991. A Review of assessing the accuracy of clasifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment* 37:35-46.
- DALEN, L. y HOFGAARD, A., 2005. Differential Regional Treeline Dynamics in the Scandes Mountains. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 37, No. 3, 284–296 pp.
- GRAF, K. 1996. Algunos apuntes sobre el paleoclima en los Andes venezolanos hace 13.000 años. *Plántula* (1)-1:95-106.
- GUISAN, A. y THUILLER, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993–1009
- GUISAN, A. y ZIMMERMANN NE. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147 - 186.
- HAMANN, A; KOSHY, M.P; NAMKOONG, G y YING, C.C. 2000. Genotype x environment interaction in *Alnus rubra*: developing seed zones and seed transfer guidelines using spatial statistics and GIS. *For. Ecol. Manage.* 136: 107–119.
- HIJMANS, R; CAMERON S; PARRA, J.; JONES, P y JARVIS A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *international journal of climatology* 25(15): 1965-1978.
- HIJMANS, R. y GRAHAM C., 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global change biology* 12, 2272-2281.
- HULME, P.E. 2005. Adapting to climate change : is there scope for ecological management in the face of a global threat? *Journal of Applied Ecology* 42:784-794.
- HULME, M. y SHEARD, N., 1999. Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte. Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido. 6pp.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2000, Data Distribution Center. The SRES emissions scenarios. <http://www.ipcc-data.org/>. Socio-economic data, SRES scenarios. 10 de diciembre 2007.
- JONGMAN, R. H. G., TER BRAAK, C. J. F. y VAN TONGEREN, O. F. R., 1995. Data analysis in community and landscape ecology. Cambridge university press.
- JOSSE C., CUESTA F., NAVARRO G., BARRENA V., CABRERA E., CHACÓN-MORENO E., FERREIRA W., PERALVO M., SAITO J. y TOVAR A. 2009a. Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima.
- JOSSE C., CUESTA F., NAVARRO G., BARRENA V., CABRERA E., CHACÓN-MORENO E., FERREIRA W., PERALVO M., SAITO J. y TOVAR A. 2009b. Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, LTA-UNALM, IAvH, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima.
- KIMBALL, K. y WEIHRAUCH, D., 2000. Alpine Vegetation Communities and the Alpine-Treeline Ecotone Boundary in New England as Biomonitors for Climate Change. USDA Forest Service Proceedings. Rocky Mountain Research

- Station 15(3), 93-101 pp.
- KÖRNER, CH. y PAULSEN, J., 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography* 31, 713 – 732 pp.
- LACHNIET, M.S. y VAZQUÉZ-SELEM, L., 2005. Last Glacial Maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela). *Quaternary International*, 138-139C: 129-144 pp.
- MARN - MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES. 2005. Primera comunicación nacional en Cambio Climático de Venezuela. Proyecto MARN-PNUD VEN/00/G31. Caracas Venezuela.
- MILLER, J y FRANKLIN, J; 2002. Modeling the distribution of four vegetation alliances using generalized linear models and classification trees with spatial dependence. Part 1. *Ecol. Modell.* 157: 227–247.
- MONASTERIO, M. 1980. Las formaciones vegetales de los Páramos de Venezuela. En: M. Monasterio (Ed): *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*, Editorial de la Universidad de Los Andes, Mérida, 47-91 pp.
- MONASTERIO, M. y REYES, S., 1980. Diversidad ambiental y variación de la vegetación en los páramos de los Andes Venezolanos. En: M. Monasterio (Ed): *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*, Editorial de la Universidad de Los Andes, Mérida, 47-91 pp.
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science* 4(3): 313 – 332.
- OLIVIER, F. y WOTHERSPOON SJ. 2005. Modelling habitat selection using presence-only data : Case study of a colonial hollow nesting bird , the snow petrel. *Ecological Modelling* 5:187-204.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. 2004. Sistema de Clasificación Bioclimática Mundial. Centro de Investigaciones Fitosociológicas, Madrid y Departamento de Biología Vegetal II. Facultad de Farmacia, Universidad Complutense. Madrid. <http://www.globalbioclimatics.org/>
- RULL, V; VEGAS-VILARRUBIA, T; NOGUE, S; MONTOYA, E; CAÑELAS, N. y LARA, A. 2007. Quaternary paleoclimatology, neotropical biodiversity, and potencial effects of global warning. *Contributions to science*, 3 (3): 405–413pp., Institut d'Estudis Catalans, Barcelona- España.
- SALES, M., SOUZA, C., KYRIAKIDIS PC., ROBERTS, D.A. y VIDAL E. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia, Brazil. *Ecological Modelling* 205(1-2): 221-230.
- SANTAELLA, W. 2007. Cambio del paisaje en la línea transicional páramo-selva nublada, sector La Aguada de la vertiente norte de la Sierra Nevada de Mérida. Trabajo especial de grado. Facultad de humanidades. Universidad Yacambú. Barquisimeto, Venezuela.
- SARMIENTO, G. 1986. Ecological features of climate in high tropical mountains. En: Vuilleumier F. y Monasterio, M. (Eds). *High altitude tropical biogeography*. Oxford University Press.
- SCHUBERT, C. y L. VIVAS. 1993. Morfología periglacial: El páramo. *El Cuaternario de la Cordillera de Mérida, Andes venezolanos*. S. C. y. V. L. Mérida, Universidad de Los Andes/ Fundación Polar.
- SOBERÓN, J. y TOWNSEND PETERSON, A. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10.
- STANSELL, N; ABBOT, M; POLISSAR, P; WOLFE, A; BEZADA, M. y RULL, V. 2005. Late quaternary deglacial history of the Merida Andes, Venezuela. *Journal of Quaternary Science* 20(7-8) 801-812 pp.
- SUÁREZ DEL MORAL, P. 2009. Modelización de la distribución de la línea de contacto bosque-páramo en Los Andes venezolanos. Trabajo Especial de Grado. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas. Departamento de Biología. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- SUÁREZ DEL MORAL, P. y CHACÓN-MORENO E. En preparación. *Diversidad climática del estado Mérida*.
- USGS. United States geological Survey. <http://eros.usgs.gov/>
- VAN DER HAMMEN, T., 1974. The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography*, 1, 3-26 pp.
- WEINGARTEN, B; YURETICH, R; BRADLEY, R. y SALGADO-LABORIAU, M. 1990. Characteristics of sediments in an altitudinal sequence of lakes in the Venezuelan Andes: Climatic implications. *Journal of South American Earth Science*, Vol.3 No. 2/3, 113-124 pp.
- ZHAO, CHUANYAN, ZHONGREN NAN, GUODONG CHENG, JUNHUA ZHANG, Y ZHAODONG FENG. 2006. GIS-assisted modelling of the spatial distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the Qilian Mountains, northwestern China based on biophysical parameters. *Ecological Modelling* 191(3-4): 487-500.

Recibido 21 de mayo de 2010; revisado 27 de octubre de 2011; aceptado 13 de diciembre 2011