

INFORME DEL JURADO NOMBRADO POR EL CONSEJO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES PARA CONSIDERAR EL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO DE LA BACHILLER

PATRICIA MARGARITA SUAREZ DEL MORAL

En Mérida a los diez (10) días del mes de septiembre del 2009, a las 4:00 p.m. se reunieron los Profesores: Eulogio Chacón, Teresa Schwarzkopf y Benito Briceño, de la Facultad de Ciencias, miembros del jurado nombrado por el Consejo de la Facultad de Ciencias, para revisar el Trabajo Especial de Grado que sobre el tema: **“Modelización de la distribución de la línea de contacto bosque-páramo en Los Andes Venezolanos”** presentado por la Bachiller **PATRICIA MARGARITA SUAREZ DEL MORAL**, titular de la Cédula de Identidad N° V- 14.828.646 para optar al título de:

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes. Acto seguido se procedió a oír la exposición que sobre el tema arriba mencionado realizó la Bachiller **PATRICIA MARGARITA SUAREZ DEL MORAL**

Después del correspondiente Interrogatorio, el Jurado procedió a deliberar sobre la calificación del trabajo sometido a su consideración.

Finalmente el Jurado lo declaró aprobado con la calificación de Veinte (20) puntos y Recomendado para su publicación.



Prof. Eulogio Chacón Moreno
Tutor



Prof. Teresa Schwarzkopf
Jurado



Prof. Benito Briceño
Jurado

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

Núcleo "Pedro Rincón Gutiérrez", Edificio "A", Facultad de Ciencias Mérida 5101 - República Bolivariana de Venezuela
Teléfono: (58 - 274) 240 1291 / 240 1292 - Fax: 240 1290 - Web: www.ciens.ula.ve Correo_e: dptobiologia@ula.ve

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
INSTITUTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y ECOLÓGICAS

**MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA LÍNEA DE
CONTACTO BOSQUE-PÁRAMO EN LOS ANDES VENEZOLANOS.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN BIOLOGÍA

Br: Patricia Margarita Suárez del Moral

Tutor: Eulogio J. Chacón-Moreno

Jurados: Benito Briceño

Teresa Schwarzkopf

Michel Ataroff (Suplente)

Trabajo especial de grado financiado por:

CDCHT proyecto C-1591-08-01-F

LEAF-IAI CRNII 005

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos, que sin cuestionar sólo esperaron...

A las personas que me acompañaron todo este tiempo...

Técnicos del ICAE: Francis, Zulay, Williams, gracias por los buenos ratos compartidos y los almuerzos que refrescaron bastante los momentos más difíciles...

A Nancy por haberme acobijado bajo su ala durante mis 4 años de permanencia en el instituto...

Darcy, amiga, sencillamente gracias por todo..!

Compañeros de laboratorio, Alma y Kike, gracias por los aprendizajes y experiencias...tuvieron conmigo palabras de aliento que sólo un amigo es capaz de brindar...Que viva la autosustentabilidad..!

A mi compañera prepa Lirey, qué hubiese sido de mí sin las catarsis en el banquito..!

A estudiantes del PET, Carmen Julia, Uno, Caribay, gracias por los ratos amenos que pasamos juntos...

Pancha, gracias por los consejos y apoyo, gracias por escuchar...

Rapha, gracias por ser tan buen jefe para esta prepa...

Luis Daniel, buena parte de mi formación como preparadora te la debo a ti, gracias...

Profe Anairamiz gracias por su confianza en mi trabajo como prepa...

A los profes con quienes compartí durante la opción y al tutor, gracias por los consejos y enseñanzas que hoy día forman y formaran parte de mí como profesional...

A todas aquellas personas que de una u otra forma saben que fueron apoyo y fuente de consejos durante este recorrido, profesores del ICAE y profesores del departamento de biología...

Gracias..!

RESUMEN

El ecosistema Páramo en los Andes venezolanos encuentra su óptimo entre los 3000 y 4800 m aproximadamente, con temperaturas medias de 9,6 °C. evidenciándose que la transición entre el bosque preparamero y el páramo abierto no se encuentra a la misma elevación a lo largo del núcleo central de la Cordillera de los Andes Venezolanos, ubicándose a mayores elevaciones en las zonas más húmedas y a menores elevaciones en zonas más secas. En el caso de las húmedas, el ecosistema inferior al bosque preparamero es la selva nublada, para las secas el bosque siempreverde seco y para las xéricas el matorral xérico.

Las temperaturas, el régimen hídrico, la exposición y la pendiente son los principales condicionantes ambientales para el establecimiento de la vegetación, resultando para el caso de la alta montaña tropical la disminución paulatina de la temperatura y el aumento en la amplitud térmica a mayores elevaciones.

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 estas variables ambientales y que están determinando las variaciones en la ubicación altitudinal de la zona de transición hacia el paramo abierto. A partir de estos resultados se modeló la ubicación altitudinal del límite bosque-páramo, ubicación que parece señalar que no es la disponibilidad hídrica o el total anual de precipitaciones lo que determina que el límite en las zonas secas se encuentre más abajo sino la marcada estacionalidad y el contraste entre épocas secas y húmedas.

Considerando las amenazas más inmediatas para el funcionamiento del ecosistema páramo como sugieren las proyecciones del IPCC sobre el aumento de la temperatura como resultado de la actividad humana; el modelo antes obtenido se utilizó para evaluar los potenciales efectos sobre la distribución del páramo ante aumentos de temperatura y disminución de las precipitaciones.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN **9**

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	9
-Área de estudio	10
-Hipótesis de trabajo	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 ESQUEMA DE TESIS	13

CAPÍTULO 2. BASES CONCEPTUALES Y METODOLÓGICAS **15**

2.1 VEGETACIÓN Y CLIMA: LIMITACIONES	15
2.2 DINÁMICA DE LA LÍNEA DE BOSQUE EN LOS ANDES VENEZOLANOS	18
2.3 CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS IMPLICACIONES	21

CAPÍTULO 3. VARIABLES AMBIENTALES ANDINAS **25**

3.1 INTRODUCCIÓN	25
3.1.1 TEMPERATURA	26
3.1.2 PRECIPITACIÓN	26
3.1.3 TOPOGRAFÍA	28
3.1.4 INTERPOLACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS	28
3.1.5 DATOS CLIMÁTICOS ADICIONALES	30
3.2 METODOLOGÍA	30
3.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM). PENDIENTE Y EXPOSICIÓN.	30
3.3.2 SELECCIÓN Y UBICACIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.	33
3.3.3 REGRESIONES ALTOTÉRMICAS.	34
3.3.4 INTERPOLACIÓN.	35
-Precipitaciones	35
-Temperaturas	35
3.3.5 DATOS CLIMÁTICOS ADICIONALES.	35
3.4 RESULTADOS.	35

3.4.1 PENDIENTE Y EXPOSICIÓN.	35
3.4.2 SELECCIÓN Y UBICACIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.	36
3.4.3 REGRESIONES ALTOTÉRMICAS.	38
-Temperaturas medias, máximas y mínimas.	38
-Temperaturas medias de vertiente húmeda y seca.	40
3.4.4 INTERPOLACIÓN	41
-Precipitaciones	41
-Temperaturas	42
3.4.5 DATOS CLIMÁTICOS ADICIONALES.	43
3.5 DISCUSIÓN.	44
3.5.1 TOPOGRAFÍA.	44
3.5.2 CLIMA.	44
<u>CAPÍTULO 4 BIOCLIMA DE LOS ANDES</u>	<u>50</u>
4.1 INTRODUCCIÓN	50
4.1.1 BIOCLIMATOLOGÍA	50
4.1.2 ÍNDICES OMBROTÉRMICOS.	51
4.2 METODOLOGÍA	53
4.2.1 ÍNDICE OMBROTÉRMICO - IOD2	53
4.2.2 CLASIFICACIÓN BIOCLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	55
4.3 RESULTADOS	56
4.3.1 ÍNDICES OMBROTÉRMICOS	56
4.3.2 CLASIFICACIÓN BIOCLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	56
4.4 DISCUSIÓN.	58
<u>CAPÍTULO 5. PATRÓN DE DISTRIBUCIÓN DEL BORDE DE CONTACTO BOSQUE-PÁRAMO</u>	<u>60</u>
5.1 INTRODUCCIÓN.	60
5.2 METODOLOGÍA.	62
5.2.1 UNIDADES DE MUESTREO.	62
5.2.2 EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN	65
5.2.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y DISPERSIÓN DE PUNTOS.	66
	6

5.2.4 ANÁLISIS BOX PLOT	67
5.2.5 ANÁLISIS MULTIVARIADO	67
5.3 RESULTADOS	68
5.3.1 UNIDADES DE MUESTREO.	68
5.3.2 EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN	69
5.3.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y DISPERSIÓN DE PUNTOS.	70
5.3.4 ANÁLISIS BOX PLOT	78
5.3.5 ANÁLISIS MULTIVARIADO	82
5.4 DISCUSIÓN	84

CAPÍTULO 6. MODELO DE DISTRIBUCIÓN DEL BORDE DE CONTACTO BOSQUE-PÁRAMO Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. **91**

6.1 INTRODUCCIÓN.	91
6.1.1 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.	93
6.2 METODOLOGÍA.	94
6.2.1 VARIABLES ASOCIADAS AL LÍMITE.	94
6.2.2 MODELOS “CAJA” .	95
6.2.3 MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL LÍMITE BOSQUE-PÁRAMO.	95
6.2.4 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO OPTIMISTA.	96
6.2.5 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL BOSQUE PREPARAMERO EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.	96
6.3 RESULTADOS	97
6.3.1 VARIABLES ASOCIADAS AL LÍMITE.	97
6.3.2 MODELOS “CAJA”	97
6.3.3 MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL LÍMITE BOSQUE-PÁRAMO.	99
6.3.4 MAPA DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL BOSQUE PREPARAMERO EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.	102
-Escenario del UKMO.	102
-Escenario del CCCMA.	103
6.3.5 COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y MODELO.	105
-Modelo de distribución potencial vs escenario del UKMO	105
-Modelo de distribución potencial vs escenario del CCCMA	106
6.4 DISCUSIÓN.	107

6.4.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL BOSQUE PREPARAMERO	107
6.4.2 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL BOSQUE PREPARAMERO EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.	111
<u>CAPÍTULO 7. CONSIDERACIONES FINALES</u>	115
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	118
<u>ANEXOS</u>	124
ANEXO 1.	125
REGISTRO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADO EN EL ESTUDIO.	125
ANEXO 2.	126
ASPECTOS GENERALES PARA LA REALIZACIÓN DE KRIGING DE DATOS DE PRECIPITACIÓN.	126
-Nugget	127
-Sill	128
-Range	128
ANEXO 3.	129
MATRIZ PRESENCIA-AUSENCIA AUSENCIA DE LOS LIMITES INFERIOR Y SUPERIOR DEL BOSQUE PREPARAMERO.	129

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema y justificación del trabajo

Tomando en cuenta que la distribución de la vegetación depende principalmente de las condiciones climáticas y que las proyecciones de cambio climático para el país 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 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. La causa de aparición del límite altitudinal del bosque continuo, de acuerdo a trabajos realizados en el tema para tratar de dilucidar una respuesta a este fenómeno, apunta a la temperatura (Korner 1998, Korner y Paulsen 2004). Se observa que la disponibilidad hídrica no da señas en primera instancia de estar asociada a la aparición del límite *per se* (Hoch y Körner 2005). Es necesario, sin embargo, conocer cómo la temperatura está interactuando con otras variables ambientales que pudieran estar amortiguando o incrementando su efecto y por ende afectando o modificando la ubicación altitudinal de la línea de bosque.

Las predicciones del MARNR (2005) para el país en 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 mundial de temperaturas de hasta 6 °C para el año 2100 (Hulme 1999).

La necesidad de conocer la respuesta y distribución de un ecosistema ante los posibles cambio climáticos requiere de herramientas que permitan predecir o esbozar a futuro dicha distribución y la generación de modelos bajo escenario de

cambio climático representarían una herramienta útil en este sentido. También se podría 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. Vale acotar que el presente trabajo se encuentra bajo el marco del proyecto internacional financiado por el Instituto Interamericano para la investigación en Cambio Climático (IAI) y el proyecto LEAF: From Landscape to Ecosystem: Across-scales Functioning in Changing Environments y cuyo objetivo principal es predecir el comportamiento de ecosistemas contrastantes como lo son la selva y el páramo ante el cambio climático y los desplazamientos de sus límites altitudinales bajo distintos escenarios de dicho cambio climático.

La posibilidad de evaluar la interacción entre la temperatura y las características topográficas a las cuales está asociada la presencia del límite del bosque continuo, a través de correlaciones entre información topográfica y climática del área de estudio, permitirá la evaluación del efecto del aumento en la temperatura sobre el desplazamiento altitudinal en la línea de bosque generando un nuevo patrón de distribución del bosque preparamero.

-Área de estudio

La realización de este trabajo se enmarca en Los Andes venezolanos, específicamente en la Cordillera de Mérida, 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) (figura 1). Su levantamiento comenzó hacia fines del Eoceno hasta alcanzar una elevación similar a la actual durante el Plioceno tardío, y su elevación actual a fines del Pleistoceno justo antes del Cuaternario. Los Andes se caracterizan geomorfológicamente por el modelado glacial por encima de los 3000 m con circos, aristas, Till morrénico y valles en "U" y por modelado fluvio-glacial por debajo de ese nivel, evidenciado por terrazas fluvio-glaciales (Schubert 1980). 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.

de arbustos enanos y gran predominio de rosetas caulescentes y acaulescentes como forma de vida (Yáñez 1998).

Como toda transición entre ecosistemas, no es abrupta, sino gradual, presentando fluctuaciones en la altitud a la cual se ubica esa zona de transición, caracterizada por presentar intrusiones de Páramo dentro de la selva nublada o bosque seco y viceversa a manera de lenguas de vegetación.

El presente trabajo se centra en el bosque preparamero, ecosistema transicional entre el bosque seco o la selva nublada y el páramo. Este bosque preparamero que puede ser visto como una franja que bordea el límite inferior del páramo es el objeto de estudio, donde se buscará evaluar la distribución que presenta esta franja de vegetación en función de las variables ambientales propias del ecosistema, evaluaciones en las que es necesario tener en cuenta los límites tanto superior como inferior de la mencionada franja de bosque preparamero.

-Hipótesis de trabajo

Partiendo de que la distribución altitudinal de la transición entre el bosque y el páramo responde a determinadas condiciones climáticas propias del gradiente altitudinal, donde resalta la temperatura como principal factor limitante para el avance del bosque continuo sobre el páramo y las características topográficas como la pendiente y la exposición que determinan el establecimiento de la vegetación; se espera en consecuencia que: a) existan relaciones significativas entre los parámetros climáticos y topográficos con la distribución altitudinal de la franja de bosque preparamero que puedan ser explorados a través de correlaciones y modelos espaciales y b) a partir de estos modelos espaciales se puedan generar nuevos modelos en los que se incluyan los aumentos de temperatura previstos para el país bajo distintos escenarios de cambio climático y se puedan evaluar las variaciones en la ubicación altitudinal del límite de bosque en tales escenarios.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar a escala regional el patrón de distribución del borde de 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.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recolectar información climática disponible para el estado Mérida como información esencial para el análisis.
- Analizar los patrones espaciales de las variables ambientales (precipitación, temperatura, exposición, pendiente y altitud) para el área de estudio.
- Determinar espacialmente la distribución del borde de contacto bosque-páramo a través de la selección de ventanas de observación a lo largo del núcleo central de Los Andes.
- Correlacionar la distribución altitudinal del borde bosque-páramo con las variables ambientales.
- Modelar espacialmente la distribución de la línea de bosque con base en los modelos de correlación
- Modelar la ubicación del borde bosque-páramo en escenarios de cambio climático.

1.3 Esquema de Tesis

El presente trabajo especial de grado se encuentra desarrollado a lo largo de seis capítulos que abarcan cada uno una fase diferente del trabajo. En cada uno de estos capítulos se desarrollará con detalle los antecedentes y bases conceptuales

asociadas a cada tema, así como el detalle de los aspectos metodológicos inherentes a cada producto. En el último capítulo se presentarán consideraciones y recomendaciones finales de trabajo

El primer capítulo abarca el planteamiento del problema, justificación, hipótesis y objetivos a cumplir en el desarrollo del trabajo, el segundo capítulo una breve reseña de los antecedentes de estudio de la línea de bosque y su dinámica en el tiempo, además de una breve introducción al cambio climático global. El tercer capítulo abarca toda la recolección y análisis de variables climáticas y la generación de información en forma de mapas de distribución de las mismas; el capítulo cuatro comprende la clasificación bioclimática del área de estudio y la información obtenida de este aspecto. El capítulo quinto detalla la selección de las ventanas de observación y el proceso mediante el cual se pudo condensar toda la información ya generada y la evaluación de las correlaciones realizadas entre los pares de variables asociadas al límite del bosque y toda la exploración estadística de los datos; el sexto contiene los modelos de ubicación del límite de bosque y los respectivos modelos en escenario de cambio climático y por último el séptimo presenta una serie de consideraciones generales de todo el trabajo realizado y recomendaciones sobre las posibles aplicaciones que puede tener la información generada.

Capítulo 2. Bases conceptuales y metodológicas

2.1 Vegetación y clima: limitaciones

La distribución de la vegetación a lo largo de un gradiente altitudinal responde a las condiciones ambientales presentes en ese gradiente; para Arundel (2005) ya desde 1807 Alexander Von Humboldt reconocía la importancia del clima en controlar la distribución de los distintos tipos de vegetación. Las bajas temperaturas propias de la alta montaña y de las mayores latitudes son un factor clave limitante para el establecimiento de la vegetación arbórea (figura 2), y se observa que los árboles están particularmente excluidos de las regiones más frías del planeta (Grace *et al.* 2002).

En la alta montaña tropical las bajas temperaturas, junto a las pronunciadas pendientes, la elevada radiación y la marcada nubosidad representan un reto para el establecimiento de la vegetación arbórea dando origen así a lo que se conoce como el límite altitudinal del bosque (Camarero y Gutiérrez 2004, Cavieres y Piper 2004, Körner 1998, Körner y Paulsen 2004, Tranquillini 1979). Este límite, lejos de ser una transición bien delimitada, es una zona de transición gradual que al ser observada a pequeña escala es abrupta (Körner y Paulsen 2004).

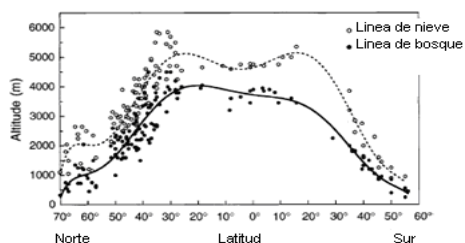


Figura 2 Ubicación de la línea de bosque en las diferentes latitudes. Nótese que el límite para el establecimiento de la vegetación disminuye a mayores latitudes las cuales representan menores temperaturas. Tomado de Körner (1998)

Sin embargo, existen géneros de árboles que son capaces de crecer muy por encima de este límite altitudinal de bosque. Tal es el caso del genero *Polylepis* restringido a la cordillera andina donde se encuentra que *P. tarapacana* es la forma de vida arborescente que alcanza las mayores altitudes en el mundo (Rada

et al. 2001) llegando hasta los 5200 metros debido a que presenta características adaptativas excepcionales ante las condiciones climáticas extremas (Rada *et al.* 1996, Kessler 2006).

Numerosas hipótesis se han planteado para tratar de explicar el por qué de este límite y a qué se debe el que los árboles no avancen a mayor altitud. Entre las hipótesis más citadas están las analizadas por Körner (1998) que plantean de manera general cómo numerosos factores como el estrés a bajas temperaturas y el daño mecánico pudieran estar afectando la capacidad reproductiva, el crecimiento y la adquisición de carbono. Esta última, cuestionada por el mismo autor al sugerir que en bajas temperaturas la división celular así como la diferenciación de tejidos durante el crecimiento se ven limitadas mucho antes de que ocurra déficit de fotoasimilados (Jobbágy y Jackson 2000, Körner 1998).

Aún cuando numerosos estudios y experimentos se han llevado a cabo a nivel mundial para tratar de explicar este fenómeno, no se ha podido llegar a un consenso general sobre la causa de aparición del límite, sin embargo, si se ha aceptado que la temperatura está asociada a esta interrupción de la vegetación arbórea (Hoch y Körner 2003, Jobbágy y Jackson 2000, Körner 1998, Körner y Paulsen 2004).

Por otra parte, la baja disponibilidad de agua por temperaturas congelantes; también pudiera estar influyendo en la aparición de la línea de bosque. El hecho de que para esta línea en los trópicos no se registren temperaturas promedio inferiores a los 4 °C (Körner y Paulsen 2004) es indicativo de que existe disponibilidad de agua (figura 3) y que no existen limitaciones de este recurso ni por congelamiento ni por alteraciones de su densidad. Es importante resaltar que los climas tropicales a diferencia de los climas de mayores latitudes, presentan poca variación térmica mes a mes (Sarmiento 1986), de allí que estos valores para los trópicos puedan de una u otra forma ser extrapolables a todo el año. No se descarta aún así, que la amplitud térmica propia de la alta montaña tropical esté generando ciclos de congelamiento y descongelamiento.

Esta posible disminución de la temperatura nocturna con valores inferiores a los 0 °C (Cavieres y Piper 2004) puede inducir el congelamiento de agua en el suelo o incluso de tejidos, ocasionando un grave daño a la vegetación no adaptada a ello o imposibilitando el establecimiento de la misma.

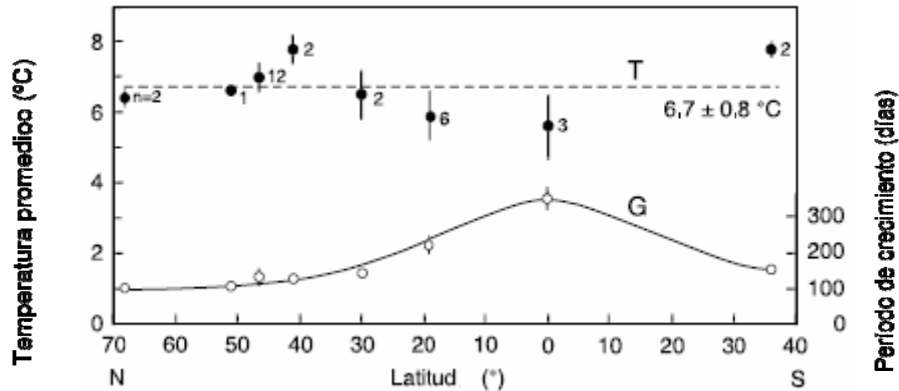


Figura 3 Temperaturas promedio en suelo durante estaciones cálidas de líneas de bosque en distintas latitudes. La línea punteada representa la temperatura promedio de todas las localidades consideradas. Obsérvese que para los trópicos la temperatura no desciende por debajo de los 4 °C (círculos llenos). Nótese igualmente que el periodo de crecimiento para las localidades tropicales es de prácticamente 365 días (círculos vacíos) Tomado de Körner y Paulsen (2004).

Además de la temperatura y la disponibilidad de agua, la elevada radiación conlleva a unas elevadas tasas evapotranspirativas que no necesariamente se ven compensadas con la disponibilidad de agua en suelo. Estas elevadas tasas evaporativas también pudieran verse incrementadas como resultado del aumento en el coeficiente de difusión del vapor de agua al disminuir la presión atmosférica a mayores altitudes (Smith *et al.* 2003), favoreciendo el fenómeno de aparición de la línea de bosque (Mayr *et al.* 2003).

Sin embargo, la gran mayoría de los trabajos realizados sobre el tema hacen especial hincapié precisamente en la temperatura como principal factor limitante. El déficit hídrico, limita el crecimiento en cualquier parte; la línea de bosque se encuentra con elevada frecuencia restringida en su límite inferior por bosques nublados o montanos lo que representa disponibilidad hídrica. En regiones secas extratropicales también se observa la aparición de este límite aunque a mayor altitud (Hoch y Körner 2005) de allí que el déficit hídrico no pareciera ser responsable de la aparición del límite. Se ha encontrado en los estudios realizados

que las líneas de bosque a nivel mundial tienen en común temperaturas promedio en suelo de 5°C-7,5°C durante el periodo de crecimiento con un promedio global de 6°C (Körner y Paulsen 2004). Por esta razón los estudios que se realizan se enfocan tanto en la temperatura.

Esta probable asociación entre las temperaturas y el límite de crecimiento continuo de bosque, despierta el interés de cuál pudiese ser el efecto de interacción entre variables ambientales ligadas al comportamiento de la temperatura en una región de tan alta variabilidad ambiental como lo son Los Andes Venezolanos y la ubicación altitudinal de la línea continua de bosque. Además se observa que la transición altitudinal entre un tipo de vegetación y otro no es homogénea en respuesta precisamente a condiciones climáticas locales. Este tipo de respuesta es fundamental para entender las proyecciones de los efectos del cambio climático global, donde el aumento de la temperatura augura el desplazamiento de los páramos hacia mayores altitudes y a ocupar cada vez menores áreas, comprometiendo la biodiversidad del paisaje.

2.2 Dinámica de la línea de bosque en Los Andes venezolanos

Los factores que se reconoce actúan como limitantes para el avance altitudinal del bosque continuo, en particular la temperatura, no han sido estables a lo largo del tiempo. La sucesión de periodos glaciares e interglaciares han generado a lo largo de la historia del planeta Tierra variaciones en las condiciones climáticas que han determinado desplazamientos y avances o retrocesos de vegetación en respuesta a tales condiciones climáticas. Tales variaciones son más sensibles en las altas montañas debido a que las variaciones de temperatura pueden ser bastante acentuadas en distancias horizontales relativamente cortas. 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 inestabilidad climática durante el pleistoceno (Van Der Hammen 1974). Específicamente mayores temperaturas trajeron como consecuencia el avance de la línea de bosque sobre el ecosistema inmediato superior, el páramo y menores temperaturas ocasionaban un avance del páramo hacia menores altitudes (figura

4). Estas observaciones indican que la vegetación responde a las condiciones climáticas del entorno y alcanzará un mayor desarrollo dentro de determinados rangos climáticos.

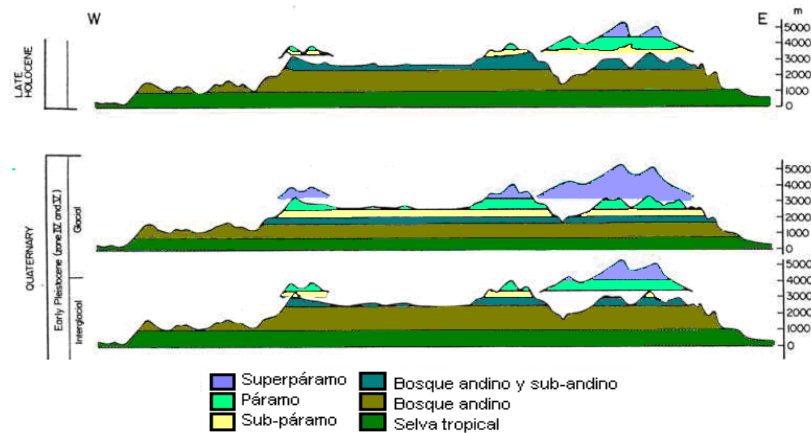


Figura 4 Variaciones en la distribución altitudinal de la vegetación en Los Andes colombianos. La sucesión de periodos interglaciares a glaciares generó variaciones en la distribución de los distintos tipos de vegetación en respuesta a las variaciones primordialmente de la temperatura. Modificado de Van Der Hammen (1974).

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, evidenciado por la predominancia de polen de elementos herbáceos (Graf 1996). Reconstrucciones climáticas para Los Andes venezolanos con base en la morfología del terreno y al modelado glacial, 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 con temperaturas 8.8 °C menores a las temperaturas actuales (Lachniet *et al.* 2005, Stansell *et al.* 2005 y 2007, 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 dos tipos de vegetación o ecotonos, son las más susceptibles a los cambios en las condiciones

ambientales (Brubaker 1986, Camarero y Gutiérrez 2004). Tanto los cambios en la variabilidad climática como en los valores promedios de las variables de igual índole generan alteraciones en los ecosistemas (Ni et al. 2006). Estas alteraciones se evidencian precisamente en esas variaciones altitudinales del límite del bosque (Grace et al. 2002), lo cual hace de los ecotonos buenos indicadores de cambio en las condiciones climáticas.

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 preparamero con la selva nublada en las vertientes húmedas y con el bosque siempreverde seco en las vertientes secas. Este bosque preparamero se encuentra en el piso altitudinal andino y es conocido también como bosque altimontano norte-andino siempreverde de acuerdo a la homologación realizada para la elaboración del mapa de Ecosistemas de Los Andes del Norte y Centrales (Josse *et al.* 2009). Este bosque altimontano se ha encontrado que difiere significativamente en su extensión altitudinal según la vertiente donde se encuentre ubicado, observándose que en las vertientes húmedas el espesor de la franja altitudinal que abarca es menor que en las vertientes secas (ver figura 5).

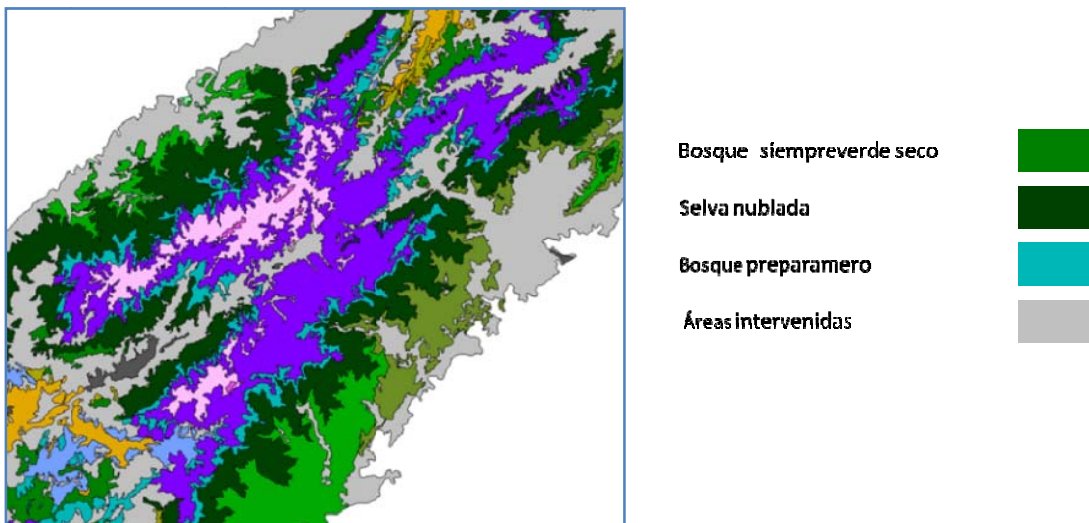


Figura 5 Detalle del mapa de ecosistemas de Los Andes venezolanos. Se aprecia la distribución del Bosque altimontano. Nótese las diferencias entre unidades ecológicas en contacto con el paramo representado como arbustales y frailejonales altimontanos paramunos. Chacón-Moreno et al. (En preparación)

Este ecotono o transición bosque-páramo se reconoce que 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 pudieran estar afectando este patrón, entre estos las características del terreno, pendiente, exposición y microtopografía que podrían afectar la ubicación de la línea de bosque (Dalen y Hofgaard 2005, Kimball y Weihrauch 2000).

2.3 Cambio climático y sus implicaciones

El clima del planeta no ha sido estable a lo largo del tiempo, se advierte que ha sufrido variaciones atribuibles a la dinámica misma del planeta, en especial a cambios cíclicos en la órbita que describe. Estos cambios comprometen la excentricidad de la órbita terrestre mediante variaciones en la inclinación y dirección del eje alrededor del cual gira el planeta, además de la precesión de los equinoccios (Rull *et al.* 2007), generando contrastes y variaciones en la cantidad y distribución de la energía solar que recibe el planeta, los cuales son responsables de la sucesión de períodos glaciares e interglaciares en lo que se conoce como ciclos de Milankovitch. No obstante desde el pasado siglo se ha observado una marcada variación en el clima y un acelerado aumento de las temperaturas y de ocurrencia de desastres asociados al clima, tales como huracanes e inundaciones (MARN 2005).

Desde finales del siglo XIX se han reportado aumentos en la temperatura de 0,4 °C a 0,8 °C en la superficie de la Tierra. Actualmente las estadísticas climatológicas arrojan tendencias al aumento de las temperaturas globales que según Hulme (1999) serán de entre 1,3 °C y 4,6°C para el año 2100 (figura 6) y que para Venezuela, Colombia, Perú y Ecuador la temperatura ya ha aumentado

alrededor de 0,8°C en el último siglo, reportándose incluso para Venezuela una disminución de las áreas cubiertas por hielo.

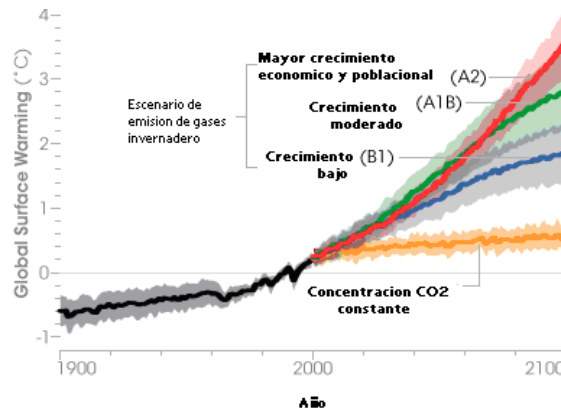


Figura 6 Escenarios de aumento de temperaturas en superficie terrestre. El aumento previsto es de hasta 4 °C en escenario de mayor crecimiento económico y poblacional. Modificado de U.S Environmental Protection Agency (2008).

En la primera comunicación nacional en cambio climático de Venezuela (MARN, 2005) se expone que en el país 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 años. Esto trae como consecuencia la disminución en la oscilación térmica de casi 3,5 °C; hecho particularmente favorable para la proliferación de plagas y enfermedades en cultivos. Así mismo esta disminución en la amplitud térmica diaria pudiera tener efectos diferentes en las vertientes secas y húmedas de Los Andes venezolanos, pues en las vertientes secas las oscilaciones diarias son mayores que en las húmedas (Monasterio 1980). Con respecto a la precipitación, se obtuvo igualmente de la primera comunicación en cambio climático para el país (MARN 2005), que la tendencia ha sido a la disminución de valores extremos en época seca aumentando los lluviosos en época húmeda.

En relación a las causas del cambio climático actual surgen teorías encontradas. Por un lado están las que sostienen que el cambio se debe a inestabilidades propias del sistema climático, que han ocurrido en el pasado y es de esperarse

que ocurran de nuevo en el futuro (Rial 2004) y las que apoyan que el aumento de la temperatura es principalmente resultado de la acción antrópica y que los cambios en el uso de la tierra contribuyen al cambio climático. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés, en su cuarto reporte apoyó esta última, exponiendo un reporte amplio y exhaustivo que evidencia que el cambio climático, específicamente el aumento en la temperatura si está ocurriendo y se debe sin lugar a dudas a la actividad humana (PNUMA 2007) y que de seguir, los aumentos serán de 0,2 °C por década. Más allá de cuestionarse el origen del cambio, la realidad es que está sucediendo y está afectando el funcionamiento de los ecosistemas y por tanto impactando la calidad de servicios que obtenemos de ellos (Dale 1997).

Se reconoce que el cambio climático es multidimensional (Jump y Peñuelas 2005), abarcando una gran cantidad de variables climáticas y que las variaciones no necesariamente son proporcionales unas con otras ni ocurren todas en el mismo sentido (aumento o disminución); así mismo la respuesta ante el cambio puede ser positiva o negativa, ya que la respuesta de la mayoría de los procesos fisiológicos no es lineal (Aber *et al.* 2001)

La naturaleza compleja del clima y la incertidumbre sobre condiciones futuras no permite la predicción exacta del clima a futuro. Sin embargo los cambios a largo plazo en las condiciones ambientales más limitantes para la vegetación son los que permiten estimar respuestas climáticas a futuro (Bergant *et al.* 2006). Es debido a esta incertidumbre que a las proyecciones sobre el cambio climático se les refiere como escenarios y no como predicciones.

Si bien las meras proyecciones sobre el aumento de la temperatura incidirían directamente sobre la distribución de la vegetación, ésta depende también de factores modificadores locales como la pendiente y la exposición, así como de una compleja interacción entre ellos (Dalen y Hofgaard 2005, Pfeffer *et al.* 2003). Esto partiendo del hecho de que estas variables topográficas representan factores capaces de modificar localmente el impacto de las condiciones climáticas de una región.

Los Andes venezolanos exhiben una gran gama de condiciones topográficas resultado de la gran actividad geológica en el área que dio origen a los levantamientos montañosos que conocemos hoy día, (Ataroff y Sarmiento 2004). Esta variedad de condiciones topográficas dotan a Los Andes de una gran variabilidad climática local y de diversos tipos de vegetación asociados a cada uno de los pisos altitudinales presentes. Así mismo la dinámica de los eventos glaciales en la zona, la alternancia de épocas frías y secas con épocas cálidas y húmedas durante el pleistoceno como consecuencia de esta dinámica, favorecieron la creación de nuevos espacios para el establecimiento de la vegetación (Mahaney *et al.* 1997).

Aun cuando las causas del cambio climático en los trópicos suramericanos no se han dilucidado, para Venezuela ha sido reconocido por algunos autores que los cambios más recientes tuvieron un origen mas asociado con fluctuaciones propias del sistema climático que con la acción humana (Rull *et al.* 2005).

Esta síntesis de los aspectos conceptuales abordados en el trabajo permitió comprender, discutir y analizar los resultados obtenidos. Se iniciará el siguiente capítulo haciendo un análisis de los datos climáticos en el área de estudio, datos que sirvieron como fuente de información base para la generación del modelo de distribución del bosque preparamero.

Capítulo 3. Variables ambientales andinas

3.1 Introducción

La variabilidad climática presente en Los Andes venezolanos genera la aparición de los pisos de vegetación (Monasterio 1980), los cuales responden a las condiciones climáticas propias del piso donde se encuentran. Monasterio (1980) reconoce 3 pisos altitudinales, el subandino, el andino y el altiandino; que se extienden desde los 2000 metros aproximadamente hasta las mayores cumbres andinas venezolanas, 4998 metros aproximadamente; con 9 tipos de vegetación asociada distribuidas entre los 3 pisos, donde resaltan primordialmente los páramos por su alto grado de endemismo.

Dentro de la íntima asociación que existe entre la topografía de la región y sus características climáticas se encuentran las variaciones en la temperatura a lo largo del gradiente altitudinal, la cual para Los Andes varía a una tasa promedio de 0,6 °C por cada 100 metros (Andressen y Ponte 1973). Con respecto a la precipitación, ésta no se correlaciona con la altitud como la temperatura lo que la hace predecible su distribución espacial.

Estas características climáticas producto de la ubicación de la cadena montañosa en la circulación de los vientos y distribución de las precipitaciones, son responsables de la heterogeneidad y diversidad de la vegetación, contándose además con otras variables como la humedad, la insolación y la evaporación que influyen en esta diversidad. De estas últimas variables, la insolación se puede analizar como consecuencia directa de la altitud cuyos moduladores vendrían siendo la exposición y la pendiente. Por otra parte, la evaporación y la humedad ambiental son consecuencia directa de las precipitaciones, su distribución y de la temperatura.

En esta sección del trabajo, se propone realizar un análisis de las precipitaciones y la temperatura; esto ante la escasez de otros datos meteorológicos, particularmente de datos de radiación y de humedad relativa. Este análisis es

representativo del complejo climático del área y permite esbozar la relación entre la distribución de dichas variables y la distribución altitudinal de la vegetación en el núcleo central de Los Andes venezolanos. Esta evaluación comenzará con la generación de la información respectiva; tanto la distribución de las precipitaciones como de las temperaturas en el área de estudio.

Además, se presenta la relación de las variables precipitación y temperatura con las demás variables topográficas como exposición, pendiente y altitud, que igualmente serán generadas en esta fase. Toda la información generada en forma de mapas de distribución de variables realizada en este trabajo tienen sistema de coordenadas UTM datum WGS 1984 elipsoide WGS84 zona 19 y la resolución de cada mapa es de pixel de 25 x 25 metros.

3.1.1 Temperatura

El comportamiento de la temperatura en la alta montaña tropical está asociado directamente al gradiente altitudinal, donde resalta la tasa de disminución de la temperatura con la altitud seguida de la amplitud térmica o diferencias entre temperaturas diurnas y nocturnas (Ahrens 2000; Andressen y Ponte 1973).

La temperatura está fuertemente asociada a la humedad específica, donde se tiene que al disminuir la temperatura y la presión atmosférica con la altitud, disminuye la cantidad de vapor de agua que puede contener la atmosfera, de allí que los Páramos reconocidos como más secos (Ej. Páramo de San José, Pueblos del Sur) se presenten a menores elevaciones con temperaturas equivalentes a temperaturas de mayores elevaciones en regiones con mayor humedad.

3.1.2 Precipitación

Se ha reconocido para el caso del núcleo central de los Andes venezolanos que existe un máximo de precipitaciones alrededor de los 2400 metros, específicamente para las cuencas del Chama y el Mocoties, según los estudios realizados por Andressen y Ponte (1973). Se reconocen también diferencias en la distribución de las mismas, donde encontramos que para las vertientes orientadas

hacia Los Llanos existe un patrón biestacional (tropical) con un máximo de precipitaciones concentrado entre los meses de mayo a octubre y un mínimo de diciembre a marzo, con abril y noviembre como meses de transición. En las vertientes orientadas hacia el Lago de Maracaibo el patrón de distribución es tetraestacional (ecuatorial) con 2 máximos, uno entre los meses de febrero y marzo y otro entre junio y agosto; y dos mínimos uno entre abril y mayo y otro entre septiembre y noviembre (Monasterio 1980).

Este hecho genera consecuencias de relevancia ecológica tales como el grado de estrés hídrico al que pudiera estar sometida la vegetación de una vertiente u otra. Según Monasterio (1980) dentro del régimen biestacional los déficits hídricos se harían sentir con mucha más intensidad que en los regímenes tetraestacionales ya que en estos últimos la distribución de las precipitaciones es mucho más uniforme a lo largo del año. Además de esto, habría que considerar las implicaciones que pudiera tener la formación de nubes en épocas determinadas del año (lluviosas).

Estas nubes juegan un papel importante en el balance energético de la zona al evitar grandes pérdidas de calor por re-emisión de energía de onda larga desde la superficie y en la frecuencia de heladas durante las épocas secas, donde la pérdida de energía es mayor ante la casi ausencia de nubes (Monasterio 1980). Considerando que la presencia de nubes también puede bloquear la entrada de energía solar y su ausencia favorecer la entrada de la misma, es necesario recordar que en la alta montaña tropical la formación de nubes ocurre por lo general a partir de horas del medio día, justo cuando los rayos solares estarían incidiendo perpendicularmente sobre la superficie. Esto conlleva a que de alguna manera las temperaturas en estos lugares no sean tan elevadas, ya que sólo habrían recibido radiación solar de las primeras horas de la mañana y que durante las noches si bien las temperaturas pueden ser bajas, la presencia de nubes estaría impidiendo que disminuyan aun más.

De la relación entre la humedad y la temperatura, surge la interrogante ¿Cómo estaría afectando la disponibilidad de agua a la tasa de enfriamiento al aumentar la altitud? Considerando la variabilidad espacial de las precipitaciones y su

estrecha relación con la disponibilidad de agua y cómo la disponibilidad de agua puede resultar crítica en las variaciones de la temperatura, se plantea calcular regresiones altotérmicas para cada vertiente, tanto seca como húmeda con la finalidad de detectar si existen diferencias en la tasa de enfriamiento entre las regresiones altotérmicas de cada una.

3.1.3 Topografía

Existe contraste entre suaves y fuertes pendientes, exposición de laderas a distintos ritmos y ciclos de circulación de vientos, así como cambios bruscos en elevación en relativamente pequeñas distancias. Esta variabilidad topográfica está determinando, en asociación con el clima, las características de la vegetación que en ella se encuentran.

Esta asociación topografía-clima enmarcada dentro del objetivo del presente trabajo de evaluar la distribución del contacto bosque-paramo, conlleva a la necesidad de generar información utilizable de tales atributos. En primer lugar de la topografía, para en otra etapa, correlacionarla con la información climática generada. Para generar esta información se parte del Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés), el cual es una representación digital de la elevación del terreno, y de la ayuda de un software de Sistemas de información geográfica (SIG).

3.1.4 Interpolación de Datos Meteorológicos

Afortunadamente en la climatología y la ecología se puede contar con el uso de herramientas matemáticas, particularmente geoestadísticas que a través de análisis numéricos permiten la reconstrucción y estimación del comportamiento y el valor de una variable basándose sólo en una muestra de la misma. Entre estas herramientas encontramos la técnica conocida como kriging, la cual estima el valor más probable que adquiriría una variable en un punto donde se desconoce. Tiene como base la premisa de que los puntos que se encuentren más cercanos entre sí en el espacio están más relacionados y tienen una mayor dependencia entre ellos que los que están más alejados, apreciándose para estos últimos una tendencia a

ser cada vez menos dependientes de los más cercanos entre sí, como resultado del cálculo de la diferencia entre las semivarianzas de los puntos y cómo cambian según la distancia a la que se encuentran unos de otros (Hengl, 2007).

Es importante señalar que el kriging asume relación entre la distribución de la variable y el espacio, de allí que se considere la distancia entre puntos al momento de determinar hasta qué punto existe dependencia entre los mismos (Hengl, 2007). Estos principios son los que permitirán generar con ayuda de sistemas de información geográfica, en particular ILWIS, mapas de distribución de variables o mapas raster de variables, los cuales son mapas que consisten de pixeles que contiene cada uno información definida por el usuario y asociada al fenómeno o variable estudiada. Vale resaltar que existen distintos tipos de kriging y que para este trabajo se hizo uso del kriging simple.

El proceso de generación de un mapa raster a partir de un “*krigeado*” no es solamente interpolar o extrapolar a través de cálculos matemáticos los valores de los puntos correspondientes a la variable estudiada, se debe ante todo analizar el comportamiento espacial de la variable, es decir su comportamiento en el espacio en el que se midió. Para analizar este comportamiento se utilizan principios geoestadísticos que permiten estimar la variabilidad en un espacio dado.

Estas herramientas necesarias se encuentran en el programa ILWIS, donde se pueden determinar particularmente parámetros como la autocorrelación espacial y la varianza espacial, así como las semivarianzas entre los puntos o valores considerados. El análisis del comportamiento de estos parámetros es lo que permite extraer la información necesaria para generar mapas de distribución de variables de interés en el área de estudio.

Para el caso de la temperatura en la alta montaña tropical, las interpolaciones no son efectivas ya que la principal fuente de variación viene dada por los cambios en la altitud; resaltando en este aspecto el gradiente altotérmico; de allí que se descarte desde un principio realizar kriging para esta variable; lo que nos deja con las precipitaciones para realizar la interpolación por krigado.

3.1.5 Datos climáticos adicionales

Por último, como información adicional a la contenida en los registros de las estaciones meteorológicas se cuenta con los registros de WORLDCLIM, los cuales presentan datos de temperaturas máximas, mínimas y medias así como precipitación mensual a nivel mundial, con una resolución de 1 Km² aproximadamente en la zona del ecuador (Hijmans *et al*, 2005), esta base de datos fue realizada con registros de estaciones meteorológicas de todo el mundo y haciendo uso de interpolaciones se obtuvieron los mapas de distribución de ambas variables. Para la realización de este trabajo se seleccionó sólo el área correspondiente a los Andes venezolanos con la finalidad de contar con la mayor cantidad de información disponible para el área de estudio. Con estos datos se pueden realizar comparaciones entre los valores de la interpolación por kriging utilizando los valores que resulten de la generación del mapa de distribución de la precipitación y los valores reportados por WORLDCLIM para verificar cuan confiable resulta dicha base de datos. Esta fase del trabajo presenta la gran ventaja de que en base a los resultados que se obtengan acá se pueden descartar por completo la utilización de WORLDCLIM para futuras investigaciones o reconocer que puede ser efectivo.

El análisis que se presenta a continuación de las variables ambientales andinas parte del apoyo en información climática proveniente de estaciones meteorológicas, sus registros y respectivas ubicaciones y de información proveniente del modelo digital de elevación. Ambas fuentes son las que permitirán la visualización de la distribución de las variables ambientales en el núcleo central de Los Andes venezolanos.

3.2 Metodología

3.2.1 Modelo digital de elevación (DEM). Pendiente y exposición.

A partir del DEM de Venezuela disponible se seleccionó el área de estudio correspondiente al núcleo central de Los Andes venezolanos y se obtuvo el DEM para el área de estudio (Figura 7). Este DEM, en principio, tenía una resolución de

90 x 90 m cada pixel y se procedió a remuestrear los pixeles para obtener un DEM con resolución de 25 x 25 m y ser utilizado así en el trabajo.

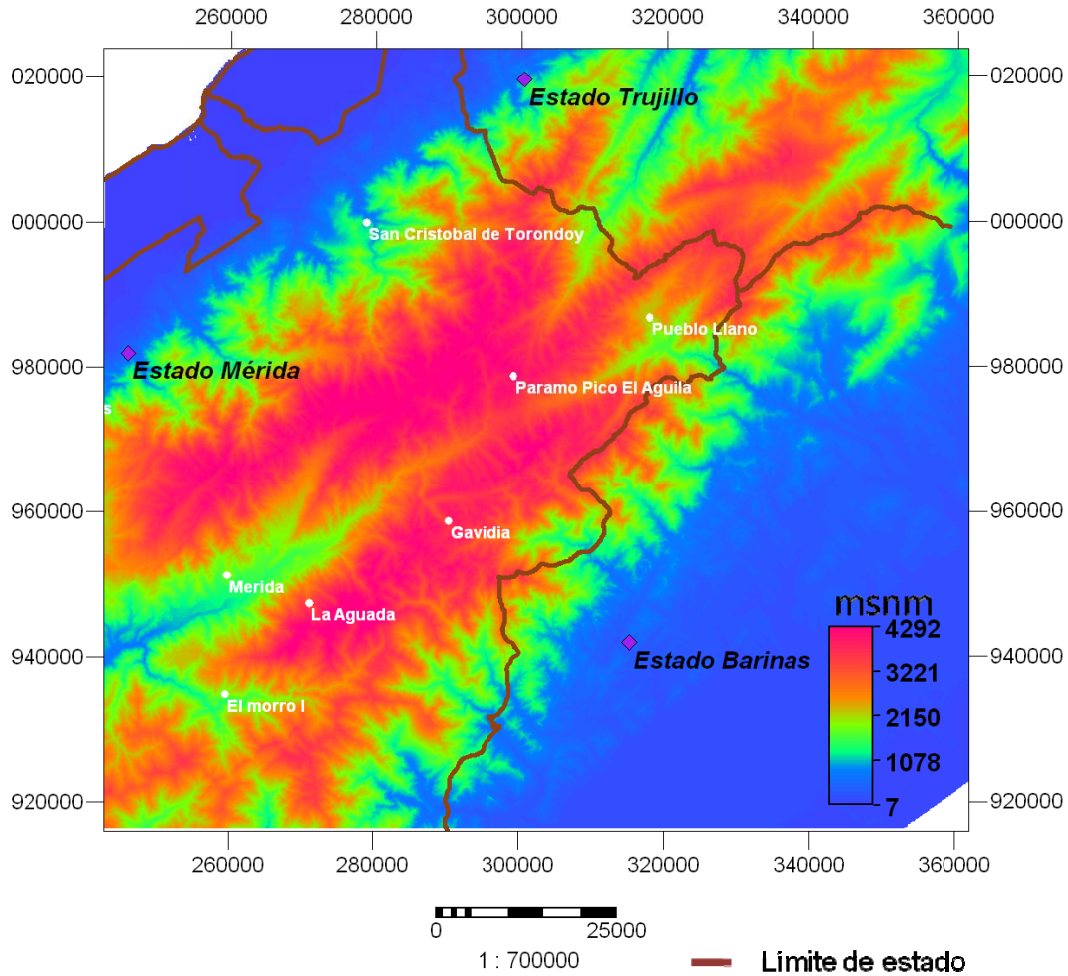


Figura 7. Modelo digital de elevación para el área de estudio.

Para generar el mapa de pendientes primero es necesario calcular dos mapas filtros que determinan las diferencias de altitud entre pixeles contiguos en direcciones X y Y; estos mapas filtros son luego introducidos en la fórmula para el cálculo de pendientes del software de SIG ILWIS (ecuación 7), donde aplicando trigonometría el programa calcula la pendiente como la hipotenusa considerando la diferencia de altitudes entre pixel y pixel en ambas direcciones X y Y y la distancia entre ellos a partir del DEM (Figura 8).

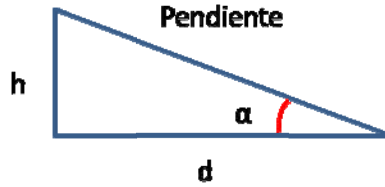


Figura 8. Esquema representando el cálculo de la pendiente por teorema de Pitágoras.

$$\text{Mapa de pendiente en grados} = \text{RADDEG}(\text{ATAN}(\text{HYP}(\text{Dx}, \text{Dy}) / \text{PIXSIZE}(\text{dem_areaestudio})))$$

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo del mapa de pendientes en ILWIS. Se muestra el algoritmo a introducir en el programa y que es leído e interpretado luego en lenguaje matemático por el mismo programa.

El mapa de exposición se calculó combinando los mapas filtros sobre el DEM y aplicando otra fórmula que da como resultado el ángulo entre dos valores X y Y (ecuación 8). Los ángulos se encuentran comprendidos entre 0° y 360° representados por una escala de grises partiendo del blanco al negro y donde los colores blancos representan exposiciones hacia el oeste, el gris exposiciones norte o sur y el negro exposiciones este (Figura 9.)

$$\text{Mapa de exposición} = \text{RADDEG}(\text{ATAN2}(\text{Dx}, \text{Dy}) + \pi)$$

Ecuación 2 Fórmula para el cálculo de mapa de exposición en ILWIS. Se muestra el algoritmo a introducir en el programa y que es leído e interpretado luego en lenguaje matemático.



Figura 9. Esquema de representación del mapa de exposición. Los tonos blancos representan exposiciones oeste y negro este.

3.3.2 Selección y ubicación espacial de estaciones meteorológicas.

Se utilizaron los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en el estado Mérida monitoreadas por el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (MARNR), la Universidad de Los Andes (ULA) y la estación meteorológica del aeropuerto monitoreada por el Servicio de Meteorología de las Fuerzas Aéreas Venezolanas (SMFAV), los cuales fueron solicitados por Anairamiz Aranguren y amablemente facilitados por ella para la realización de este trabajo.

Los registros corresponden a datos de temperatura, donde se tienen los promedios mensuales y anuales de un cierto número de años. Vale señalar que aparte de las temperaturas medias, algunas estaciones además presentaban registros de temperaturas máximas y mínimas; los demás registros corresponden a los totales mensuales y anuales de precipitación.

Algunos de los totales o promedios anuales, según fuesen precipitación o temperatura respectivamente, presentados en las estaciones meteorológicas, no eran correctos; tal como se comprobó al verificar aleatoriamente estos resultados en varias estaciones; hecho este que conllevó a la necesidad de calcularlos todos. Esta irregularidad deja abierta la posibilidad de que algunos de los registros mensuales sean erróneos y sin posibilidad de correcciones dado que son la mínima expresión bajo la cual se registran en la información suministrada. Para la utilización de estos datos fue primero necesaria la depuración de los mismos.

Se eliminaron los registros de aquellos años en los que faltaba al menos un registro mensual con la finalidad de tener registros completos anuales para cotejar con otros meses de otros años u otras localidades. De esta limpieza de datos se obtuvieron: 112 estaciones en total distribuidas en: 21 estaciones con registros de temperaturas, de las cuales 20 presentan registros de temperatura media, y 15 de temperaturas máximas y mínimas solamente; y 91 estaciones con registros de precipitación.

Se eliminaron aquellos registros que sólo arrojaron datos completos para uno o dos años, considerándose sólo aquellos que presentaron 3 o más años de datos. Se incorporaron además los datos de precipitación, temperaturas máximas, media y mínimas de la estación meteorológica ubicada en Gavidia (datos suministrados por Prof. L. Sarmiento).

El total de estaciones para la caracterización climática del área fue de: 15 estaciones con registro de temperaturas medias y 13 de temperaturas mínimas y máximas, y 89 estaciones con registro de precipitaciones, para un total de 103 estaciones. Se construyó una base de datos con información detallada sobre las estaciones. Las estaciones fueron ubicadas espacialmente según sus coordenadas con ayuda del software de percepción remota y sistema de información geográfico (SIG) ILWIS 3.3 y se generó un mapa de puntos de ubicación de estaciones meteorológicas y sus respectivos registros según fuesen temperaturas promedio o totales anuales de precipitación.

3.3.3 Regresiones altotérmicas.

Partiendo de la relación entre la altitud y la temperatura, donde la disminución de la temperatura responde a una regresión lineal; a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas de temperaturas promedio medias, máximas y mínimas, y la ubicación altitudinal de la localidad correspondiente, se calculó la regresión altotérmica para cada temperatura.

Considerando la relación entre la temperatura y la humedad relativa se realizó el cálculo de regresiones altotérmicas según vertiente seca o húmeda. Con ayuda de la visualización del mapa de puntos generado, el grupo de estaciones de temperatura se separó en dos, las que están ubicadas en vertiente húmeda y las que están ubicadas en vertiente seca.

Las ecuaciones resultado de las temperaturas medias, máximas y mínimas fueron utilizadas para generar los mapas de distribución de tales variables, a través de la función de cálculo de mapas del SIG utilizado: ILWIS 3.3.

A las ecuaciones resultado de las regresiones según vertientes, se les aplicó la prueba de comparación de dos coeficientes de regresión descrita por Segnini (2004).

3.3.4 Interpolación.

-Precipitaciones

Para generar el mapa de distribución de las precipitaciones se utilizó el mapa de puntos generado con la ubicación de las estaciones meteorológicas y se realizó un análisis de correlación espacial y krigeado. Los pasos a seguir para realizar el análisis geoestadístico de la variable se detallan en la guía anexa: *Aspectos generales para la realización de kriging con datos de precipitación.*

-Temperaturas

Para generar los mapas de distribución de las temperaturas se utilizó el DEM y la ecuación de regresión altotérmica de cada temperatura. Esta ecuación se incorporó al SIG a través de la función de cálculo de mapa.

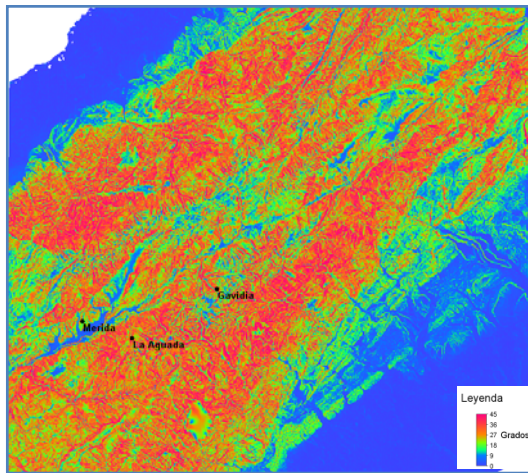
3.3.5 Datos climáticos adicionales.

Los registros de WORLDCLIM y los valores modelados por krigeado de las precipitaciones, se correlacionaron con los valores de precipitación reportados por las estaciones meteorológicas para evaluar cuán confiable es la base de datos WORLDCLIM.

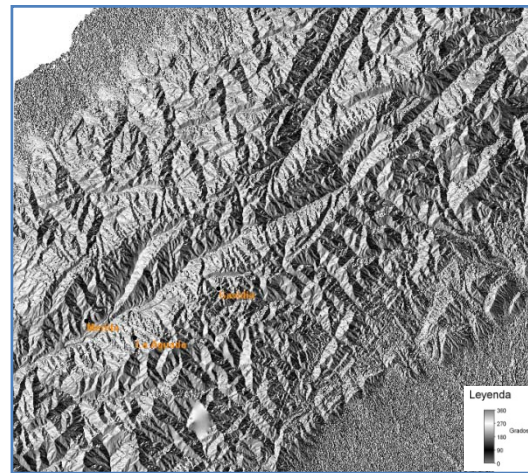
3.4 Resultados.

3.4.1 Pendiente y exposición.

Se presentan a continuación los mapas de pendiente y exposición generados a partir del DEM. (Figura 10).



A.



B.

Figura 10. A) Mapa de pendientes. B). Mapa de exposiciones. Nótese la elevada variabilidad en ambos casos.

El mapa de pendiente se distribuye desde 0° a 45° o 100% de pendiente, con predominancia de pendientes entre los 27° y 36°, bastante cercanas a pendientes del 100%, Las pendientes más suaves se encuentran hacia las regiones externas a la cordillera y en pequeños sectores internos a la misma. Para las áreas cuya altitud señalan un potencial contacto bosque-páramo se observa que presentan pendientes hacia los 20 °. La exposición en cambio es sumamente variable a una misma elevación.

3.4.2 Selección y ubicación espacial de estaciones meteorológicas.

El mapa de puntos permitió observar fuertes discrepancias en la ubicación de algunas estaciones dadas las coordenadas y la localidad a la cual hacían referencia. Se comprobó que dichas discrepancias provenían de la fuente original de los datos y no de su manipulación corroborando que el error provenía directamente desde la fuente original. Igualmente se ubicaron todas las estaciones originales sobre mapas base de Cartografía Nacional, para tener una idea de qué magnitud pudiese tener el error en términos de estaciones totales consideradas en principio y estaciones con errores.

El resultado fue de 12 estaciones de registros de precipitaciones y 4 de temperaturas con discrepancias entre las coordenadas señaladas por el organismo responsable de su funcionamiento y la ubicación real de la localidad a la que señalaban (Tabla 1); resaltando en particular la ubicación de la estación Bailadores cuyas coordenadas señalan a las Serranías La Esmeralda y Socopó, en las inmediaciones a la Reserva Forestal de Ticoporo, la estación La Mucuy con coordenadas correspondientes a la ciudad de Barinas, la estación Páramo La Culata con coordenadas de ubicación para el Rio La Yuca al suroeste de Barrancas, cerca de Barinitas; todas en el Estado Barinas y Los Nevados con ubicación en La Playa, estado Mérida; entre otras. El error no es apreciable solo en el formato digital cedido por el Ministerio del Ambiente, sino también en la publicación del mismo ministerio “Censo de estaciones hidrometeorológicas en funcionamiento 1994, CONICIT, Dirección de Política y Planificación del Sector Comisión Nacional de Meteorología e Hidrología” página 62. Dadas estas marcadas diferencias en las ubicaciones, se procedió a una nueva limpieza de los datos eliminando aquellos que presentaban errores en las coordenadas.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas con coordenadas erróneas y su ubicación real según cartografía nacional.

Nombre de la Estación	Coordenadas erróneas	Ubicación en cartografía nacional
Bailadores II	8°13'00.00"N, 70°52'00.00"W	Barinas -Ticoporo
La Mucuy I	8°38'00.00"N, 70°14'00.00"W	Barinas -ciudad
Los Nevados I	8°18'36.00"N, 71°46'48.00"W	Mérida - La Playa
Los Nevados II	8°18'36.00"N, 71°46'48.00"W	Mérida - La Playa
Páramo La Culata	8°44'48.00"N, 70°04'15.00"W	Barinas-Barinitas

Del nuevo proceso de depuración se obtuvo 89 estaciones: 77 con registros de precipitación, 11 de temperaturas mínimas y máximas y 12 de temperaturas medias. A partir de las ubicaciones de las estaciones se generaron dos mapas de puntos; uno para las estaciones con registros de precipitación y otro para las estaciones con registro de temperatura (figura 11).

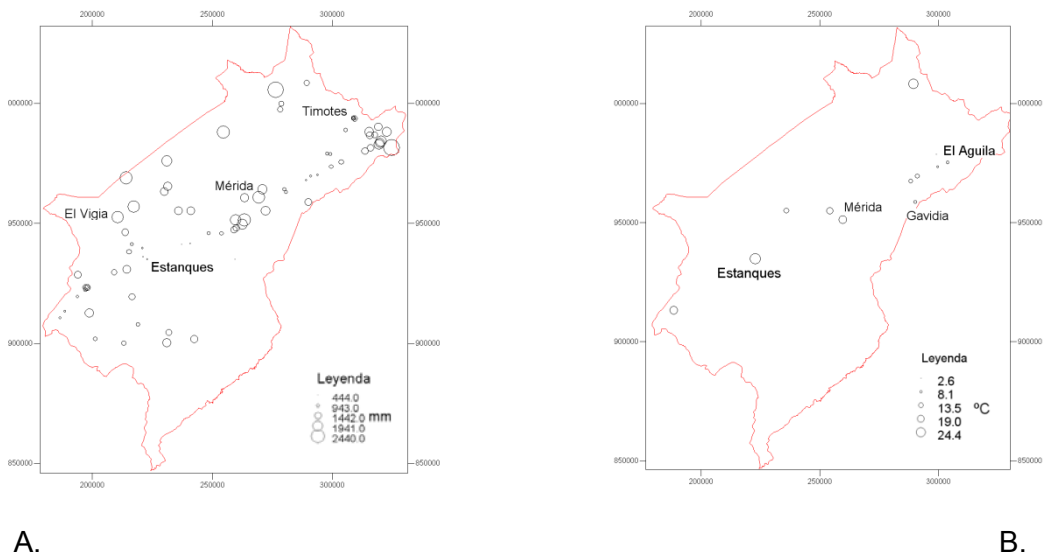


Figura 11. A) Mapa de ubicaciones de estaciones con registros de precipitación. B) Mapa de ubicación de estaciones con registro de temperatura. La relación es cercana a 6:1. El tamaño de los círculos corresponde relativamente a los valores de precipitación y temperatura respectivamente.

Se reconoce a simple vista para las estaciones con registro de precipitación un elevado agrupamiento entre estaciones con grandes extensiones sin estaciones. Para las temperaturas la situación empeora, ya que aunado al agrupamiento de estaciones hay escasez de las mismas.

3.4.3 Regresiones altotérmicas.

-Temperaturas medias, máximas y mínimas.

Se presentan a continuación las regresiones obtenidas para las temperaturas medias, máximas y mínimas (ecuaciones 3, 4 y 5).

$$\text{TEMPERATURA MEDIA} = 27.359 + (-0.00564 * \text{ALTITUD})$$

Ecuación 3. Regresión altotérmica para las temperaturas medias calculada a partir de los datos de las estaciones meteorológicas. R^2 0,957 $P < 0,0001$.

$$\text{TEMPERATURA MÁXIMA} = 32.819 + (-0.00496 * \text{ALTITUD})$$

Ecuación 4. Regresión altotérmica para las temperaturas máximas calculada a partir de los datos de las estaciones meteorológicas. R^2 0,908 P <0,0001.

$$\text{TEMPERATURA MÍNIMA} = 22.687 + (-0.00597 * \text{ALTITUD})$$

Ecuación 5. Regresión altotérmica para las temperaturas mínimas calculada a partir de los datos de las estaciones meteorológicas. R^2 0,954 P <0,0001.

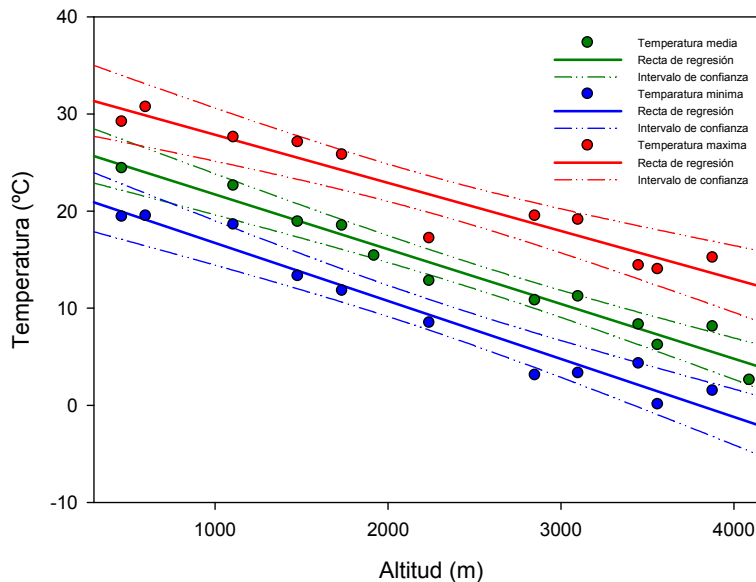


Figura 12 Regresiones de temperaturas medias, máximas y mínimas. Los intervalos de confianza para la máxima y mínima se solapan sobre la media a menores altitudes ($\alpha=0,01$) y al aumentar la altitud dejan de solaparse. Nótese que entre máxima y mínima nunca hay solapamiento.

Se aprecia que a menores altitudes existe un solapamiento entre los límites de confianza de las regresiones ($\alpha=0,01$) para la temperatura máxima y mínima sobre la temperatura media (figura 12), señalando que existe un grado de homogeneidad entre las tres y cómo a medida que aumenta la altitud, la amplitud entre las temperaturas máximas y mínimas aumenta, desapareciendo el solapamiento sobre la media.

-Temperaturas medias de vertiente húmeda y seca.

$$\text{TEMPERATURA MEDIA VERTIENTES SECAS} = 27,984 - (0,00592 * \text{ALTITUD})$$

Ecuación 6. Regresión altotérmica para vertientes secas. R^2 0,981 P < 0,0001.

$$\text{TEMPERATURA MEDIA VERTIENTES HÚMEDAS} = 26,081 - (0,00495 * \text{ALTITUD})$$

Ecuación 7. Regresión altotérmica para vertientes húmedas. R^2 0,906 P < 0,0001

Aplicando la prueba de comparación de dos coeficientes de regresión descrita por Segnini (2004), se obtuvo que no son diferentes; ambas pendientes o tasas de disminución de la temperatura al aumentar altitud estiman la misma regresión altitud temperatura (ecuaciones 6 y 7); en otras palabras, no hay indicios estadísticos que señalen que la regresión altotérmica de vertiente seca y húmeda sean diferentes. Calculando los intervalos de confianza para cada una de las rectas ($\alpha=0,01$), se encontró que existe solapamiento entre ambas (Figura 13), y de estas a su vez con la regresión de temperatura media de todas las estaciones, señalando que no existen diferencias significativas entre la regresión altotérmica de una y otra.

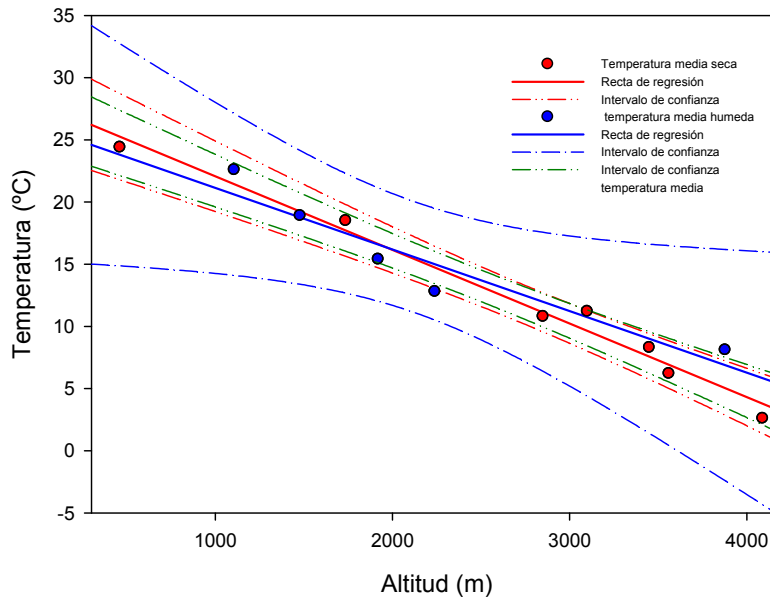


Figura 13 Regresiones altotérmicas de temperaturas medias consideradas en el estudio. Nótese cómo los intervalos de confianza para las rectas se superponen, señalando que no existen diferencias ($\alpha=0,01$).

3.4.4 Interpolación

-Precipitaciones

Se presenta el mapa de distribución de las precipitaciones resultado del krigado aplicado (figura 14). Se evidencia la marcada diferencia entre vertientes húmedas y secas, donde se pueden observar a grandes rasgos mayores valores de precipitación hacia las regiones externas a la cadena montañosa y menores hacia las regiones internas. Es de hacer notar que este patrón no es uniforme, ya que si observamos la vertiente interna, se puede apreciar la presencia de “bolsones” áridos intercalados con zonas de mayor pluviosidad.

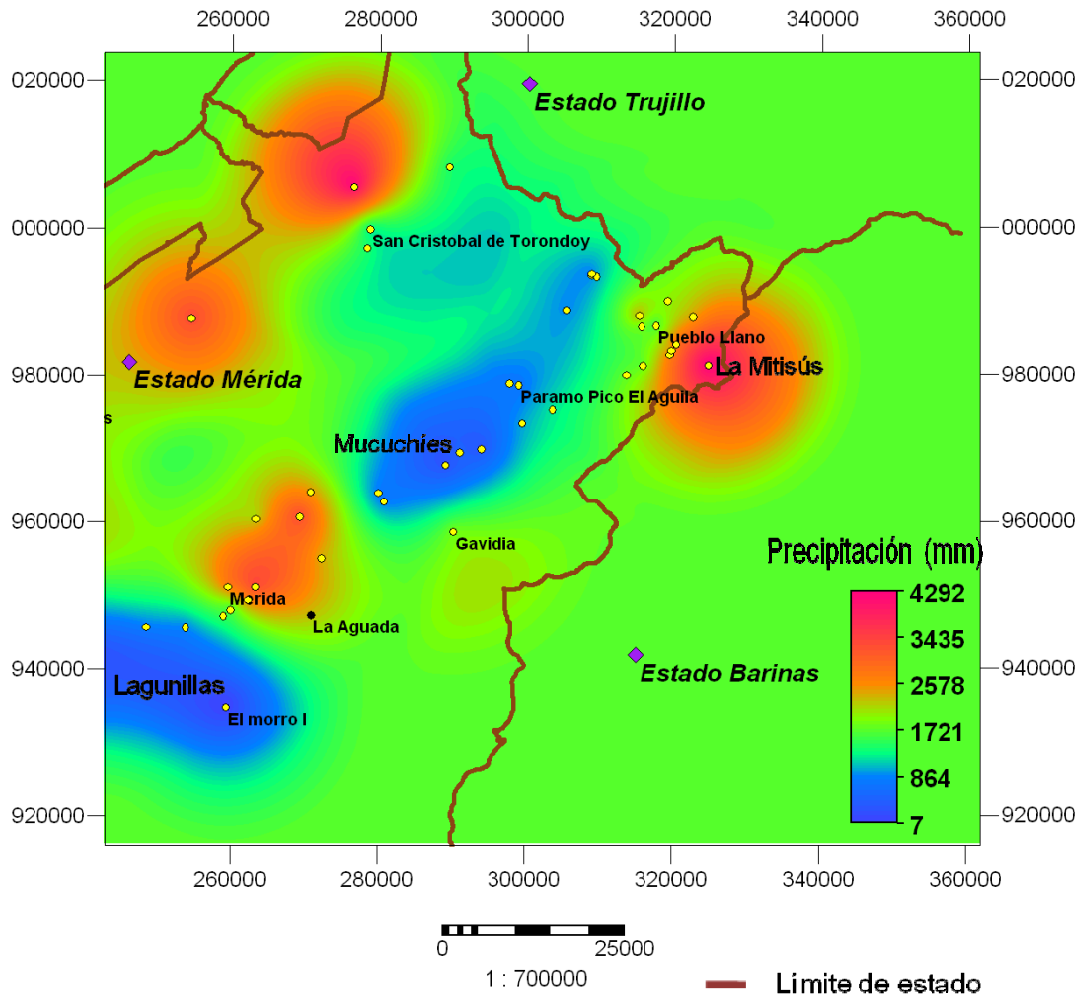
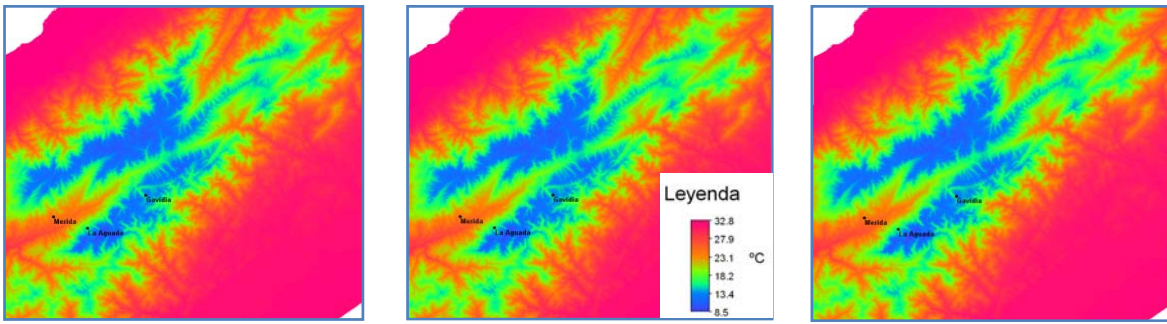


Figura 14. Mapa de distribución de las precipitaciones. Nótese los bolsones secos de Lagunillas y Mucuchies, así como el foco de elevada pluviosidad hacia La Mitisús. Los puntos amarillos representan la ubicación estaciones meteorológicas.

-Temperaturas

Se observa que las mayores temperaturas se encuentran hacia menores elevaciones y que las menores temperaturas se encuentran restringidas hacia las mayores elevaciones de la cordillera andina con temperaturas medias que oscilan entre los 27,4 °C y -0,2 °C, máximas entre 32,8 °C y 8,5°C y mínimas entre 22,7 °C y -6,5 °C (figura 15).



A.

B.

C.

Figura 15. Mapas de distribución de temperaturas promedio A) medias, B) máximas, C) mínimas. Los mapas fueron obtenidos a partir de las regresiones altotérmicas y el SIG.

3.4.5 Datos climáticos adicionales.

Se obtuvo que la correlación entre los valores de WORLDCLIM y los valores registrados por las estaciones (figura 16), aunque es significativa, es muy baja, lo que pudiera introducir error al considerar incluir más valores para realizar análisis más extensos de la variabilidad climática de la zona.

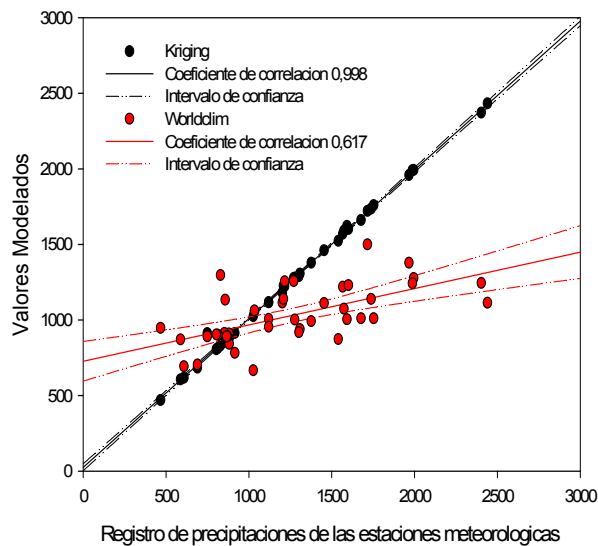


Figura 16. Correlación entre los valores modelados de precipitaciones en mapas de worldclim y registros de estaciones meteorológicas. El coeficiente de correlación es 0,617 mientras que para los valores modelados en el presente trabajo es de 0,998.

La obtención de un coeficiente de correlación cercano a 1 en la correlación entre los valores modelados en este trabajo hacia los alrededores de los registrados por la estación meteorológica brinda una muy buena aproximación del mapa generado.

3.5 *Discusión.*

3.5.1 *Topografía.*

Las pendientes que predominan en el área de estudio están comprendidas entre los 27° y 36° de inclinación, bastante cercanas a pendientes de 45 °, resultando en pendientes bastante pronunciadas y pudieran ser poco favorables para establecimiento de vegetación arbórea de gran porte.

Asociando las pendientes con el DEM, se registra que para el área de estudio que comprende el núcleo central y específicamente las áreas cuya altitud señalan un potencial contacto bosque-páramo, las pendientes más frecuentes se encuentran hacia los 20 ° de inclinación. La exposición en cambio es sumamente variable a una misma elevación. Esta particularidad pudiera generar que la amplitud de variación sea muy elevada con respecto a este atributo para las ventanas de observación que se seleccionen; situación a tener en cuenta al momento de evaluar las correlaciones que se generen de esta información. Es decir que los promedios que se obtengan de esta variable presentarían elevadas desviaciones con respecto a la media y no mostrarían correlaciones con las demás variables.

3.5.2 *Clima.*

Las características climáticas de la región junto con el efecto de la ubicación de la cadena montañosa en la circulación de los vientos y distribución de las precipitaciones arrojan una extensa variabilidad climática en la zona. Según Monasterio y Reyes (1980), en una misma vertiente pueden existir páramos muy contrastantes en cuanto a la cantidad total de precipitación anual, encontrándose diferencia de hasta 1157 mm entre el más lluvioso y el menos lluvioso, de allí que dependiendo de la localidad, el mínimo de precipitaciones puede ser un periodo

verdaderamente seco o un período menos húmedo. Si a esto se le suma el ritmo anual que siguen las precipitaciones, un período verdaderamente seco puede no necesariamente ocasionar un estrés hídrico severo en la vegetación por presentar una corta duración y estar seguido de dos periodos húmedos (patrón lacustre tetraestacional); mientras que un período menos húmedo puede representar verdadera sequía si es seguido de un periodo seco de larga duración (patrón llanero biestacional).

Vivas (1992) señala que la orientación de las laderas externas a la cordillera andina determinan en gran parte el ritmo y la distribución de las precipitaciones, debido al desplazamiento de las masas de aire provenientes del lago de Maracaibo al noroeste y de los Llanos occidentales al sureste, las cuales ascienden por barlovento descargando el agua retenida por condensación para luego descender por sotavento y absorber humedad en su recorrido.

Este patrón de circulación de vientos ocasiona que para los valles internos de la cordillera existan menores valores de precipitación total anual; sin embargo se reconoce la presencia de focos de elevada pluviosidad como resultado de la circulación de los vientos a través de estos valles internos (Figura 14), esto como resultado de la circulación de los vientos a manera de “embudo” (Vivas 1992) en respuesta a la presencia de valles longitudinales y transversales, embudos que atrapan las masas de aire cargado de agua obligándolas a descender precipitando el agua que contienen.

Tal es el caso de las localidades ubicadas cercanas a la Ciudad de Mérida, las cuales presentan mayor pluviosidad como resultado de este fenómeno; se puede observar en el mapa de precipitaciones generado cómo estas localidades se encuentran ubicadas entre dos bolsones áridos, al noreste el bolsón de Mucuchíes y al suroeste el bolsón de Lagunillas. Las masas de aire cálido provenientes de Lagunillas absorben humedad en su recorrido hacia mayores altitudes hasta el punto en que la disminución de la temperatura al aumentar esa altitud genera una disminución en la capacidad de carga de la masa de aire ocasionando que el agua

que contiene precipite, generando así el foco de alta precipitaciones en su recorrido en dirección noreste.

Una vez que el agua es precipitada, las masas de aire siguen su ascenso pero esta vez con un contenido de agua mucho menor, absorbiendo humedad en su recorrido, tal como ocurre con el bolsón de Mucuchíes.

La distribución de las precipitaciones en el sector La Mitisús y Las Mesas, donde se aprecia otro foco de altas precipitaciones, puede estar dado por las masas de aire provenientes del norte del estado Barinas y que comienzan su ascenso por la cuenca del río Santo Domingo un poco antes de entrar al estado Mérida. Estas masas de aire cálido vienen cargadas de una elevada humedad y al ocurrir el enfriamiento adiabático al ascender por barlovento descargan toda la humedad que contienen. Si a esto le sumamos el posible efecto la represa de Santo Domingo ubicada en las cercanías como fuente de humedad para las masas de aire, estaríamos reconociendo una posible explicación para la presencia de este foco de elevada pluviosidad (Figura 14) aun cuando no se tiene conocimiento de que se haya realizado una estimación de su impacto.

Con respecto a los otros dos focos de altas precipitaciones ubicados hacia la zona del Sur del Lago encontramos explicaciones similares a las expuestas para las situaciones anteriores: En particular, llama la atención el papel que juega el Lago de Maracaibo, el cual debido a la elevada evaporación es una gran fuente de vapor de agua para estas masas de aire antes de ascender por los valles hacia Los Andes (Andressen y Díaz, 2000).

Para las temperaturas máximas y mínimas, la existencia de solapamiento entre los límites de confianza de las regresiones ($\alpha=0,01$) (figura 12), señala la proximidad entre las tres y cómo a medida que aumenta la altitud, la amplitud entre las temperaturas máximas y mínimas aumenta, desapareciendo el solapamiento sobre la media.

Este comportamiento es resultado precisamente de que a menores altitudes el balance térmico es más favorable que a mayores altitudes; entendiéndose como

favorable el hecho de que existe menor contraste entre la temperatura máxima y mínima en menores elevaciones, generando en este caso, que no se presenten temperaturas congelantes, contrario a las mayores elevaciones donde el contraste es mayor, lo que resulta en temperaturas por debajo de 0 °C durante las noches.

Este fenómeno de oscilación térmica caracteriza la alta montaña tropical (Ahrens 2000) y es resultado de la interacción de la temperatura con la topografía, donde la disminución de la densidad del aire con la altitud ocasiona que durante las horas del día la entrada de radiación solar sea mayor a mayores altitudes y la salida de la misma en forma de radiación de onda larga también sea mayor. De esta manera se generan grandes contrastes entre temperaturas máximas y mínimas en la alta montaña.

Comparando con los resultados obtenidos por Andressen y Ponte (1973) la diferencia con la regresión obtenida para la temperatura media es poca, tomando como referencia que ellos obtuvieron un coeficiente de regresión promedio de 0,61 °C/100 m trabajando con datos de 14 estaciones y cuyos registros oscilaban entre 1 y 19 años y en este trabajo el coeficiente fue de 0,56 °C/100 m trabajando con 12 estaciones y registros que oscilaron entre 3 y 34 años. No se descarta que estas diferencias estén reflejando cambio en las condiciones climáticas a lo largo de los últimos 36 años y expuestas por el Ministerio del Ambiente en la Primera Comunicación de Cambio Climático par Venezuela (MARNR 2005).

La característica del vapor de agua de retener energía de onda larga en forma de calor ocasiona que en la medida que la cantidad de vapor de agua en un lugar sea menor, menores serán las temperaturas que se registren durante las noches debido a la baja retención de calor y a la pérdida por radiación de onda larga, ocasionando mayores amplitudes térmicas en el lugar (Ahrens, 2000). Este fenómeno se evidencia para el caso de Los Andes venezolanos en los bosques siempreverdes secos, distribuidos en vertientes secas a diferencia de las selvas nubladas en las vertientes húmedas donde las oscilaciones térmicas son menores (Monasterio 1980); igualmente para el caso ya comentado de los páramos ubicados a menores altitudes. En las vertientes secas el balance energético de

radiación tiende a ser más negativo debido a la menor disponibilidad de agua y vapor de agua que amortigüen las pérdidas del calor re-emitido en forma de energía de onda larga

Evaluando la regresión por vertiente, aun cuando estadísticamente no haya diferencias sí se logra apreciar con estos datos (figura 13) un patrón en el cual a partir de los 2000 metros de altitud aproximadamente, para una misma altitud, las temperaturas mínimas en las vertientes secas son menores que en las vertientes húmedas, que bien pudiera estar asociado a la amplitud térmica que caracteriza a las zonas secas en Los Andes señalada por Monasterio (1980).

Otro factor que pudiera estar influyendo en este patrón observado de temperaturas es la exposición. En este aspecto encontramos que las vertientes secas donde los bosques siempreverdes secos tienen una mayor extensión y son el ecosistema límite inferior con el bosque preparamero, reciben más horas diarias de radiación solar. La exposición que presentan estas vertientes es sureste, orientadas hacia los llanos y al salir el sol, son ellas las que reciben las primeras horas de radiación, viéndose favorecidas en cuanto a la entrada de energía solar. En contraste, en las vertientes húmedas predominan las selvas nubladas con una exposición noroeste, hacia el Sur del Lago, que ocasiona que estén expuestas a la radiación solar hacia horas del mediodía y final de la tarde, horas en las que precisamente la nubosidad en estas vertientes es mayor. Esto genera una especie de barrera a la entrada de la energía solar por el fenómeno de reflectividad o albedo ya comentado; trayendo como consecuencia que la entrada de radiación sea menor que para las vertientes secas. Se debe considerar en este punto que la nubosidad a la que se hace referencia no es precisamente la nubosidad comentada en cuanto a las diferencias en la disponibilidad de agua, sino a la nubosidad que además de la disponibilidad de agua es consecuencia del patrón de circulación de los vientos y a la geomorfología de Los Andes.

Con respecto a la base de datos de WORLDCLIM, llama fuertemente la atención las diferencias en el valor de cada punto y el mapa generado; si partimos del hecho de que WORLDCLIM utiliza bases de datos de estaciones meteorológicas

de la región, esperaríamos similitudes en el punto exacto de ubicación del valor (la estación meteorológica) y aun en distancias radiales cortas, pero no es así; generando la duda de hasta qué punto esta base de datos resulta apropiada para estudios o aproximaciones climáticas no sólo en la región sino a nivel nacional.

Estas diferencias observadas tienen distintos orígenes, entre ellos, la resolución espacial de la base de datos WORLDCLIM y la información generada en este trabajo. Es así que WORLDCLIM presenta una resolución de 1 Km² por pixel mientras que el mapa generado tiene resolución de 25 m², no obstante, las diferencias puntuales, es decir, justo en el punto de ubicación de la estación, siguen siendo importantes, lo que pudiera atribuirse a la limpieza de los datos realizada en este trabajo y a diferencias entre las estaciones utilizadas tanto en este trabajo como por WORLDCLIM .

A manera de sugerencia no está de más señalar que son necesarias más estaciones con registros completos y claros y que no dejen dudas sobre la veracidad de sus registros o de su ubicación, así como un seguimiento serio de los datos que permita realizar inferencias climáticas tal como lo establece la WMO (Organización Mundial Meteorológica por sus siglas en ingles), con series de no menos de 3 periodos de 10 años cada uno (Guttman, 1989).

Capítulo 4 Bioclima de Los Andes

4.1 Introducción

4.1.1 Bioclimatología

La bioclimatología es una ciencia ecológica relativamente nueva que relaciona y estudia las relaciones entre el clima y la distribución de los seres vivos en la Tierra (Rivas-Martínez 2004) y se fundamenta en las relaciones numéricas de dos principales variables climáticas: precipitación y temperatura. A partir de cada variable climática es posible obtener una serie de parámetros que brindan información más detallada y concreta del curso anual que sigue cada variable.

A partir de la obtención de estos parámetros se obtienen los índices bioclimáticos, los cuales son valores resultado de formulas aritméticas sencillas que integran a esos parámetros. Los valores que toma cada índice son utilizados luego para clasificar un lugar determinado a través del uso de claves bioclimáticas. Como ejemplo de parámetros e índices se encuentran los siguientes:

Tabla 2. Ejemplos de índices bioclimáticos. Nótese que se basan en sencillos cálculos aritméticos

Parámetros de precipitación		Parámetros de temperaturas		Índices bioclimáticos	
Ppi	Precipitación positiva mensual, siendo i: 1 = enero, ... , 12 = diciembre	Ti	Temperatura media mensual, siendo i: 1 = enero, ... , 12 = diciembre	lod2	Índice ombrotérmico del bimestre más seco del trimestre más seco del año
Ppd	Precipitación positiva del trimestre más seco del año	Tps1	Temperatura positiva del mes más cálido, en décimas de grados centígrados	lo	Índice ombrotérmico anual (Pp: Tp) 10
Ppd1	Precipitación positiva del mes más seco del año	Tps2	Temperatura positiva del bimestre más cálido, en décimas de grados centígrados	lodSS2	Índice ombrotérmico de los dos meses consecutivos más secos del segundo trimestre del semestre más cálido del año
Ppd2	Precipitación positiva del bimestre más seco del año	Tpw2	Temperatura positiva del bimestre más frío, en décimas de grados centígrados	ld	Índice de diurnalidad o intervalo térmico diario (T _{cmax} -T _{cmin} en grados centígrados)

En vista de las diferencias que existen entre vertientes, donde se reconocen distintos ritmos anuales de precipitaciones según la vertiente sea llanera o lacustre se presenta la necesidad de incorporar la estacionalidad como una variable más a considerar dentro del presente estudio.

4.1.2 Índices Ombrotérmicos.

La incorporación de esta variable se realizó a través del cálculo del Índice ombrotérmico del bimestre más seco del trimestre más seco del año o Iod_2 , el cual es un valor que expresa el cociente entre la suma de las precipitaciones de los dos meses más secos y la suma de las temperaturas de esos meses. La utilización de parámetros definidos como ombrotérmicos (debido a que se obtienen estableciendo relaciones entre precipitaciones y temperaturas), conduce a la definición de ombrotipos o clases ombrotérmicas, necesarias para una clasificación bioclimática que permita evaluar la disponibilidad de agua en una localidad.

El valor que arroja el cálculo de este índice Iod_2 , permite separar el bioclima de una región en pluvial y pluviestacional (tabla 4), sin considerar regiones con precipitaciones muy bajas y sin estacionalidad. Considerando que en la evaluación que se realizó se cuenta con muestreos en regiones consideradas como xéricas (arbustal xérico), se recurrió al cálculo de otro índice adicional al Iod_2 , el I_o o índice ombrotérmico anual.

Este índice ombrotérmico anual no pondera meses secos y no evalúa la estacionalidad, sino el grado de humedad en una localidad en función de las temperaturas que presente (tabla 3) y permite afinar aun más la clasificación bioclimática del área, ya que incorpora a los bioclimas estacionales que diferencia el Iod_2 , bioclimas secos como el xérico, desértico e hiperdesértico.

Tabla 3. Criterios de clasificación bioclimática. Tomado de Rivas-Martínez 2004. La clasificación de una región involucra siempre la inclusión de intervalos de unos índices dentro de los intervalos de otros índices. Nótese que el valor de I_{od} permite separar los climas netamente secos de los estacionales y a su vez clasificarlos según el grado de humedad.

Bioclima	I_{od}		Ombrotipo	I_{od_2}	Estacionalidad
Estacional	$\geq 3,6$	3,6-6	Subhúmedo	$> 2,5$	Pluvial
		6,0-12,0	Húmedo		
		12,0-24,0	Hiperhúmedo		
		$\geq 24,0$	Ultrahiperhúmedo		
	$\geq 3,6$	3,6-6	Subhúmedo	$\leq 2,5$	Pluviestacional
		6,0-12,0	Húmedo		
		12,0-24,0	Hiperhúmedo		
		$\geq 24,0$	Ultrahiperhúmedo		
Xérico	1,0-3,6	1,0-2,0	Semiárido	-	-
		2,0-3,6	Seco		
Desértico	0,2-1,0	0,2-0,4	Hiperárido	-	-
		0,41,0	Árido		
Hiperdesértico	$<0,2$	-	Ultrahiperárido	-	-

Dado que este índice permite evaluar el grado de humedad de una región, es posible conjugarlo con la estacionalidad para reconocer (adicional a esta), la cuantía que pueden presentar las precipitaciones.

El grado de complejidad que representan las clasificaciones bioclimáticas es elevado, no por los cálculos a incorporar, sino por la cantidad de información y de integración de la misma que es necesario considerar, a lo que se le suma la complejidad en la utilización de sistemas de información geográfica como herramienta para la clasificación. En vista de esto no se pretende presentar acá un extenso tratado de los fundamentos que rigen a la bioclimatología sino mas bien una explicación lo más puntual posible de la generación de los índices utilizados y de los procedimientos generales de utilización del SIG en la elaboración de las clasificaciones.

4.2 Metodología

4.2.1 Índice ombrotérmico - lod₂

Para el cálculo de este índice fueron necesarios los valores promedio de precipitaciones mensuales registrados por cada estación meteorológica considerada en secciones anteriores para la generación del mapa de distribución de precipitaciones y el mapa de temperaturas medias generado ya con anterioridad. La fórmula para el cálculo del lod₂ es como sigue:

$$lod_2 = (P_i \div T_{pi}) \times 10$$

Ecuación 8 . Fórmula para el cálculo del lod₂ .Donde P_i es la suma de la precipitación de los dos meses más secos y T_{pi} es la suma de la temperatura positiva mensual de esos meses.

Para la realización de este trabajo no se cuenta con información de temperaturas para todos los puntos o estaciones donde hay registro de precipitación, así que se optó por generar un mapa que representara el doble de temperaturas medias, a través de la introducción de un algoritmo sencillo en el sistema de información geográfico con el que se generó. Para los valores de la suma de las precipitaciones se recurrió a la base de datos de los registros de estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo, y se tomaron los valores de precipitación de los dos meses consecutivos más secos, se sumaron y con estos valores se repitió el proceso de interpolación por *krigeado* que se realizó para generar el mapa de distribución de las precipitaciones.

Una vez obtenidos ambos mapas se introdujo la fórmula para el cálculo del lod₂ en el SIG para generar el mapa de distribución de tal índice. Este primer mapa generado mostró valores numéricos del lod₂.

Sin embargo para una mejor interpretación visual del índice se realizó una clasificación en base a los valores que toma el lod₂ según Rivas-Martinez (2004) y señalados en la tabla 4.

Tabla 4. Criterios para determinación de estacionalidades según Rivas-Martínez 2004. El valor 2,5 es el criterio de separación.

Índice ombrotérmico	Bioclima
$\text{lod}_2 > 2,5$	Tropical pluvial
$\text{lod}_2 \leq 2,5$	Tropical pluviestacional

De esta clasificación surgió el mapa de estacionalidad para el área de estudio (figura 18.B) clasificando los valores mayores a 2,5 como pluviales y los menores como pluviestacionales.

Considerando que se obtuvieron valores numéricos del lod_2 , se calculó el promedio de esta variable para cada tipo de contacto sin considerar separaciones en contacto superior o inferior, ya que espacialmente la variable no debe arrojar diferencias en zonas de muestreo tan pequeñas como las ventanas de estudio. En la figura 17 se pueden observar los promedios y la línea del lod_2 que separa los valores que marcan la estacionalidad.

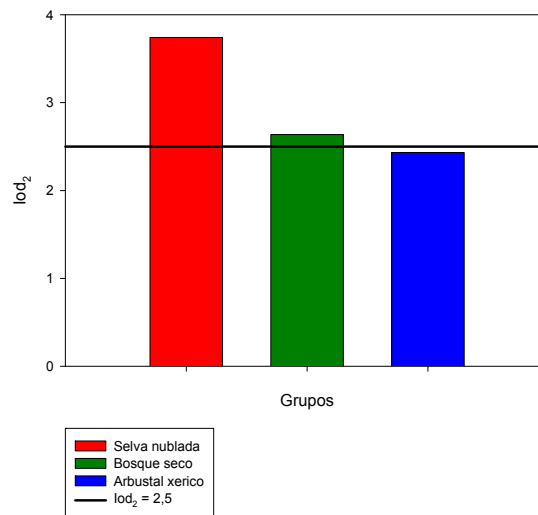


Figura 17. Los promedios de lod_2 obtenidos reflejan la distancia de cada contacto del valor crítico de separación: 2,5

En la figura se evidencia que el arbustal xérico presenta valores menores de 2,5 lo que lo señala como pluviestacional, pero cabe preguntarse cómo localidades definidas de antemano como xéricas pudieran presentar regímenes de distribución de lluvias estacionales. Se consideró entonces calcular otro índice adicional pero muy parecido al Iod_2 , el I_o o índice ombrotérmico anual, cuya fórmula es como sigue:

$$I_o = (Pp \div Tp) \times 10$$

Ecuación 9. Fórmula para el cálculo del I_o .

Donde Pp es la precipitación anual de los meses con temperaturas superiores a 0°C y Tp es la sumatoria de las temperaturas medias de los meses con temperaturas mayores a 0°C .

Con ambos índices es posible definir y clasificar bioclimáticamente el área de estudio con mayor detalle.

4.2.2 Clasificación bioclimática del área de estudio

El I_o se obtuvo a partir de información de registros de las estaciones meteorológicas igual que para el caso anterior y se generó un mapa de valores numéricos de este índice. Una vez que se obtuvo este mapa, se reclasificó considerando los valores del índice I_o que se obtuvieron, esto condujo a la generación de un mapa de ombrotipos (figura 18.A) de acuerdo a la tabla 3.

El mapa obtenido de ombrotipos se cruzó con el mapa de estacionalidad de las precipitaciones con ayuda de algoritmos del SIG utilizado y se obtuvo la clasificación bioclimática definitiva del área de estudio.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Índices ombrotérmicos

Se presentan los mapas de ombrotipos y estacionalidad (Io e lod2) para el área de estudio.

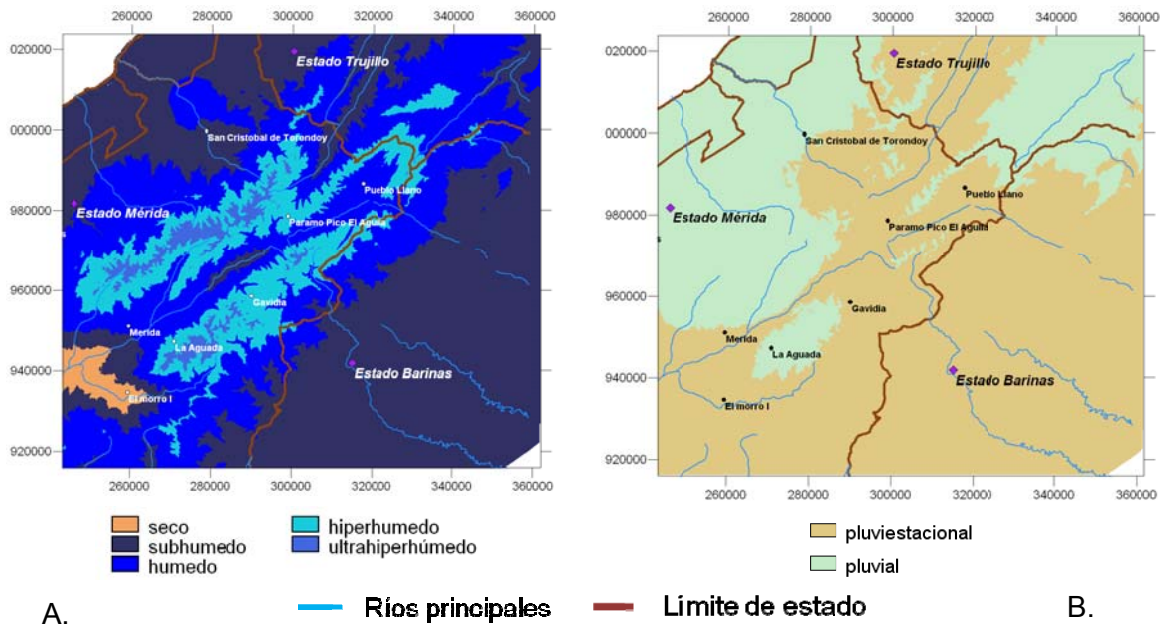


Figura 18. A) Mapa de ombrotipos. Refleja la relación que existe entre las temperaturas y el monto de las precipitaciones. B) Mapa de estacionalidades.

El mapa de ombrotipos permite observar en términos generales la presencia del bolsón seco hacia los alrededores de Lagunillas y distintas clasificaciones en términos de humedad en la cordillera.

Se observa en el mapa de estacionalidad que la separación de las vertientes lacustre y llanera es en términos de pluvial y pluviestacional respectivamente.

4.3.2 Clasificación bioclimática del área de estudio

La clasificación bioclimática permite diferenciar áreas en dos aspectos: el monto de precipitaciones que allí se registran y el ritmo o distribución que presentan.

Salvo para las regiones donde la sequia sea un elemento importante; en ese aspecto se encuentra que se diferencian dos situaciones: xérico seco correspondiente al bolsón árido de Lagunillas e hiperdesértico ultrahiperárido que corresponde a las cumbres glaciares (figura 19).

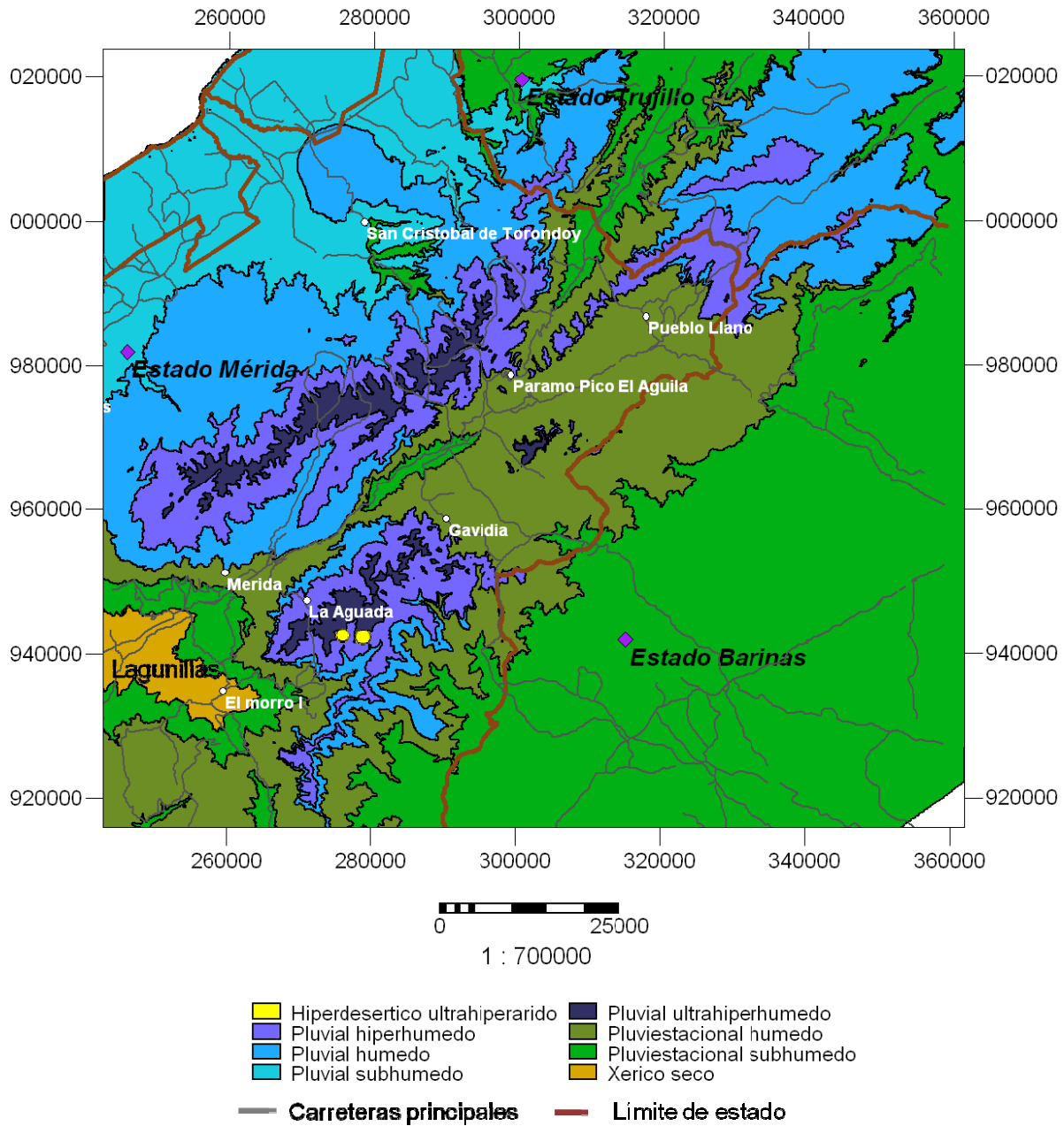


Figura 19. Bioclimas del área de estudio. El mapa resultó del cruce entre el mapa de estacionalidad y el de ombrotipos.

4.4 Discusión.

Evaluando la distribución del Iod_2 resalta que adquiera valores semejantes en altitudes tan contrastantes como el sur del Lago y la Sierra de La Culata y Sierra Nevada. Evidencia esta distribución el grado de heterogeneidad que puede existir en la región sin que sea considerado el gradiente altitudinal como directo operador en las variaciones, y que existe efectivamente variabilidad climática derivada de la interacción de aspectos entre los cuales se puede considerar el patrón de circulación de los vientos como principal actor en la distribución de las lluvias.

En el mapa de estacionalidad de las precipitaciones se evidencia de manera general, que efectivamente existe una separación del ritmo que siguen las lluvias. La vertiente lacustre con un patrón de distribución de lluvias tetraestacional, presenta estacionalidad del tipo pluvial, donde de manera general no se reconocen periodos verdaderamente secos, ya que al estar las precipitaciones distribuidas a lo largo del año en torno a dos períodos de lluvias, la sequia no es tan marcada. Caso contrario a las vertientes llaneras con un patrón biestacional y clasificadas como pluviestacionales donde el período de sequia es verdaderamente seco, ya que las lluvias se concentran en una sola época del año, ocasionando que la sequia sea más prolongada que para las pluviales.

Aunque este fenómeno suela relacionarse solo con tierras bajas, donde aunado a la ausencia de precipitaciones durante la sequia, las temperaturas elevadas generan períodos verdaderamente secos. La alta montaña tropical no escapa a este fenómeno aunque presente temperaturas más bajas. Las tasas de transpiración de la vegetación de alta montaña suelen ser mayores, debido a que con la altitud y la disminución de la presión atmosférica aumenta el coeficiente de difusión del vapor de agua (Smith *et al.* 2003).

Si a esto se le suma que la disponibilidad hídrica pueda ser desfavorable por un período de sequía, se tiene que ante bajas temperaturas la sequia puede ser sumamente marcada para los ecosistemas de alta montaña tropical, fenómeno este que conduce directamente a otro factor que puede ser prioritario al tratar de

evaluar las causas que generan la aparición del límite altitudinal del bosque: las heladas.

Durante las épocas de sequía, las noches despejadas favorecen la salida de energía de la superficie terrestre, ocasionando que las temperaturas nocturnas sean congelantes, sin que ello se ponga de manifiesto en los promedios diarios, o incluso mensuales, de temperaturas medias por debajo de 0 °C, recordando que las temperaturas diarias pueden ser elevadas y que al promediar con las nocturnas adquieren un valor positivo.

Es importante tener esto presente ya que en el desarrollo de este trabajo no se puede descartar el efecto que pudieran tener las heladas en la distribución del patrón altitudinal del bosque preparamero, ya que, aunque se hayan obtenido valores de temperaturas mínimas en las ventanas de muestreo que no se encuentren por debajo de 0 °C no se excluye la posibilidad que durante las noches las temperaturas sean congelantes y estén imposibilitando el establecimiento de vegetación, particularmente vegetación arbórea no adaptada a ello.

Una vez realizada esta caracterización a *grosso modo* del área de estudio, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de información posible a incorporar dentro de las evaluaciones a realizar de la ubicación altitudinal del bosque preparamero, el paso siguiente será la selección de áreas de muestreo en base a las cuales se pueda caracterizar el bosque y poder modelizarlo.

Capítulo 5. Patrón de distribución del borde de contacto bosque-páramo

5.1 Introducción.

La variabilidad climática y topográfica de Los Andes venezolanos determina en gran medida la presencia de diversos tipos de vegetación asociados a la interacción entre las mismas condiciones climáticas y topográficas ya discutidas en secciones anteriores; resaltando las variaciones en la vegetación a lo largo del gradiente altitudinal, donde cobra particular importancia en el desarrollo de este trabajo, la transición entre la vegetación de bosque y páramo.

Esta relación entre el clima y la vegetación determina no solo la presencia de diversos tipos de vegetación, sino su distribución, resultado de la interacción con las características topográficas de la región. Estas características son las que determinan en qué medida se manifestarán las condiciones climáticas, de un área particular, determinando en última instancia la distribución de la vegetación.

La alta montaña tropical cuenta en este aspecto, con la particularidad de presentar disminución de la temperatura al aumentar la altitud. Las bajas temperaturas ya han sido reportadas como responsables de la transición de vegetación arbórea a herbácea a nivel global, debido principalmente al daño de las estructuras leñosas ante bajas temperaturas (Körner 1998, Hoch y Körner 2003 y 2005, Körner y Paulsen 2004), la diferencia en la alta montaña tropical dentro de estos estudios globales, además de la disminución de la temperatura con la altitud, radica en que las bajas temperaturas varían poco a lo largo del año sin presentar las variaciones anuales propias de localidades extratropicales.

Esta disminución de la temperatura no escapa al efecto que pueden ejercer otras variables ambientales amortiguando o incrementando esta relación altitud-temperatura, variables como las precipitaciones, la pendiente y la exposición que juegan un papel importante en el balance de radiación.

Partiendo de esta asociación, se plantea evaluar las características ambientales que predominan en los límites de transición entre el bosque y el páramo, donde la ubicación altitudinal de este límite vendrá dada por la interacción entre las variables climáticas y topográficas, en otras palabras, la ubicación altitudinal estará en función de las variables ambientales. Función que puede ser descrita de la forma $Y = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, donde "Y" será la altitud de ubicación del límite y X_1, X_2, X_3, \dots etc. Serán las variables ambientales.

Es pertinente aclarar que la altitud en ningún momento será tratada como una variable, pues corresponde a la ubicación del límite, ubicación que vendrá dada por la interacción entre las variables que se consideren. Este capítulo presentará entonces el diseño de las unidades de muestreo para obtener la información tanto de la altitud como de las variables ambientales asociadas al límite, así como las evaluaciones realizadas a la información obtenida con la finalidad de obtener la función predictora de la ubicación del bosque.

Esta fase del trabajo incorpora la utilización del Sistema de información Geográfica o SIG, mas que para la generación de la información, como herramienta clave para la recolección de la misma. En este caso, la información generada como mapas de distribución de las variables en el capítulo anterior, será sometida a evaluación a través de la generación de ventanas de observación a lo largo del bosque preparamero utilizando como base el Mapa de Ecosistemas de Los Andes venezolanos (Chacón-Moreno *et al.* en preparación) e imagen Landsat del año 2001 del núcleo central de la cordillera de Los Andes venezolanos, donde se considerará la selección de muestreos tanto en límite superior como inferior del bosque preparamero para la correcta evaluación de la transición.

5.2 Metodología.

5.2.1 Unidades de muestreo.

Con ayuda del mapa de Ecosistemas de Los Andes venezolanos (Chacón-Moreno *et al.* en preparación) y la imagen de satélite Landsat año 2001 de la región se seleccionaron pequeñas ventanas de los distintos tipos de contacto, tanto superior como inferior del bosque preparamero, correspondiendo el ecotono superior al contacto bosque preparamero-páramo y el inferior a los contactos selva nublada-bosque preparamero, bosque siempreverde seco-bosque preparamero y arbustal montano xérico-bosque preparamero.

En el programa ILWIS se procedió a desplegar la imagen de satélite Landsat con resolución de 25 m² y sobre ella se desplegó el mapa de Ecosistemas de Los Andes venezolanos pero sólo los límites entre ecosistemas, lo que permitió aun estando superpuestas, la visualización de la imagen de satélite.

Adicional a esto se mantuvo a la vista la información que permite conocer el punto donde se encuentra ubicado el cursor (figura 20) para reconocer sobre que unidad se encuentra ubicado. Estas unidades pueden ser bosque altimontano para el caso del bosque preparamero, arbustales y frailejonales paramunos para el caso del paramo, bosques montanos pluviales para la selva nublada y bosques montanos pluvioestacionales para el bosque siempreverde seco; estas nuevas categorizaciones de la unidades ecológicas descritas por Ataroff y Sarmiento (2004) surgen de homologación realizada para la generación del mapa de Ecosistemas de Los Andes del Norte y Centrales (Josse 2008)

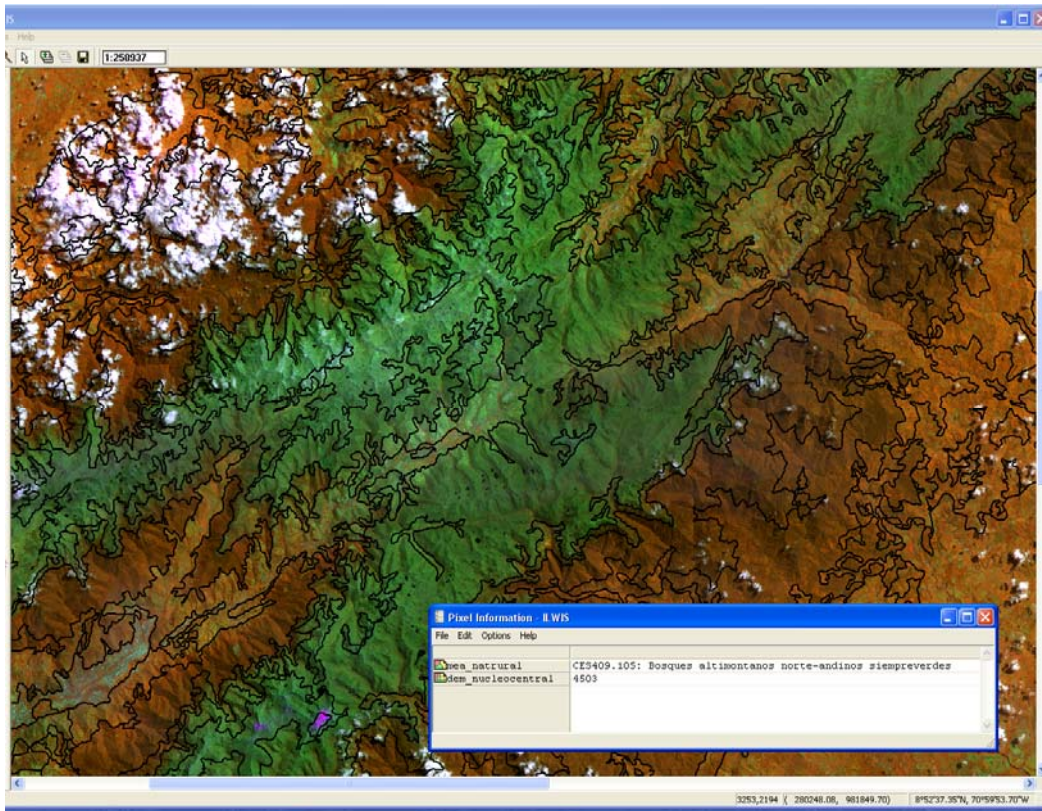


Figura 20. Representación de la metodología empleada para la selección de las ventanas de observación. Nótese como sobre la imagen satelital se pueden observar los límites entre ecosistemas y como esta información se ve reflejada en el recuadro más pequeño.

El criterio de selección de ventanas de muestreo se basó en primer lugar, en evitar zonas intervenidas. El segundo criterio de selección, se basó en seleccionar las ventanas uniformemente a lo largo de la extensión del bosque preparamero a lo largo de la cordillera y no indiscriminadamente a lo largo de la cordillera sin considerar el bosque preparamero, esto debido a que el objeto a evaluar es el bosque preparamero y su presencia (o ausencia) en determinados lugares.

Se generaron en total 79 ventanas distribuidas a lo largo del núcleo central de Los Andes. Una vez realizadas las 79 ventanas se seleccionaron dentro de las mismas 2 áreas de muestreo, una para el contacto superior y otra para el contacto inferior (Figura 21). La selección del área de muestreo se hizo siguiendo el criterio del reconocimiento de las características espectrales de los pixeles, donde se

seleccionaban pixeles con características de transición entre un ecosistema y otro; esto considerando que el mapa de ecosistemas cubre todos Los Andes venezolanos y el grado de detalle no es el mismo al que se quiere apreciar en este trabajo sólo con el núcleo central.

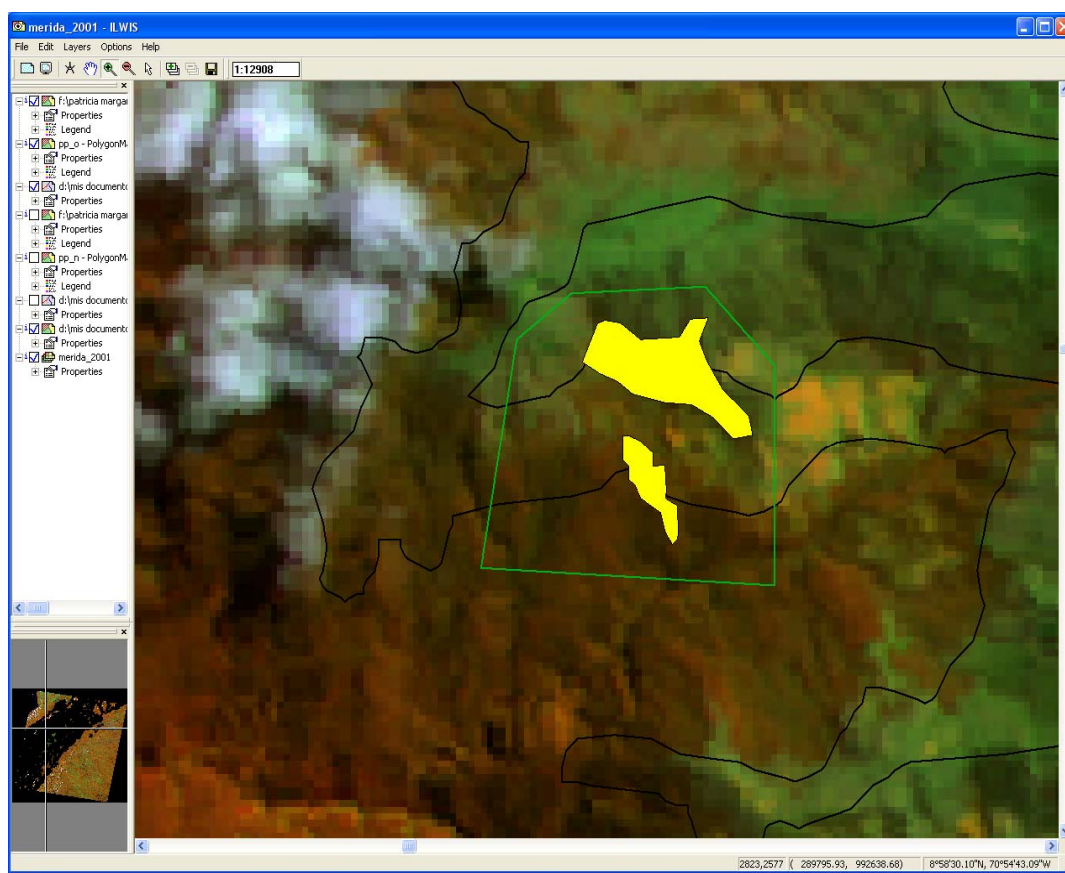


Figura 21. Detalle de la selección de las ventanas y dentro de ellas las áreas de observación para el contacto superior e inferior.

De este proceso resultaron 2 áreas de muestreo por ventana, una de contacto superior y otra de contacto inferior para un total de 158 áreas de muestreo. Estas áreas fueron transformadas a formato raster para fines de comparación y análisis con los valores de cada uno de los mapas (raster) de las variables tanto climáticas como topográficas ya realizados.

5.2.2 Extracción de información

Utilizando el SIG se extrajeron los valores de todas las variables ambientales para cada área de muestreo de cada ventana como se diagrama en la Figura 22. Tomando en cuenta que son 158 áreas de muestreo y 7 variables a considerar fue necesaria la generación de 1106 mapas raster para extraer la información.

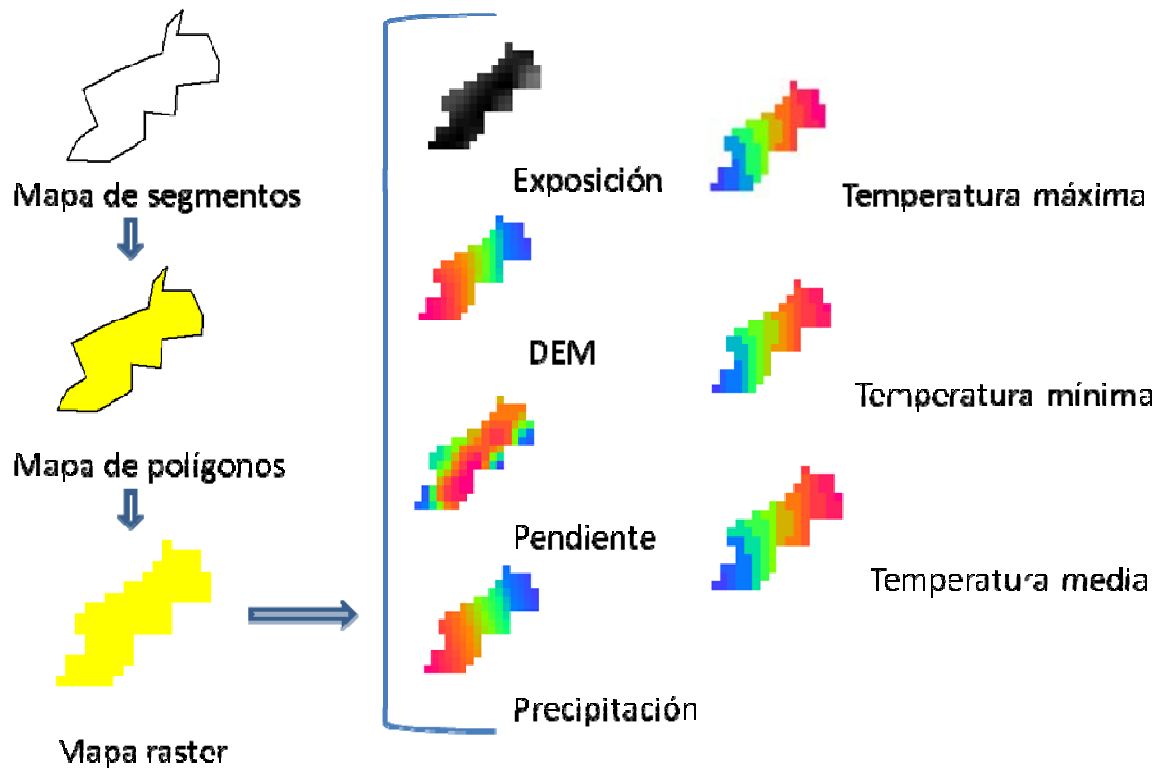


Figura 22. Esquema general presentando la información obtenida a partir del mapa de segmentos. El mapa de segmentos es el área de muestreo que se seleccionó reconociendo píxeles de transición entre ecosistemas.

La información fue dividida según el tipo de contacto que representase (selva nublada- bosque preparamero, bosque seco-bosque preparamero, arbustal xérico-bosque preparamero y bosque preparamero-paramo). Una vez que se tuvieron los 1106 mapas raster, se obtuvo a partir de ellos los respectivos histogramas, de los cuales se extrajo en primer lugar el promedio de las 7 variables para cada área de muestreo y por otra parte se calculó el promedio y el coeficiente de variación de cada variable para cada tipo de contacto. Los índices ombrotérmicos de cada área de muestreo fueron extraídos con los mapas numéricos obtenidos de tales

índices, y fue considerado el valor que tomaba la ventana, ya que no es posible hacer distinción entre límites superior o inferior de esta variable.

5.2.3 Análisis de Correlación y dispersión de puntos.

La obtención de valores promedios de cada variable para cada ventana, permitió realizar correlaciones lineales de Pearson entre las variables ambientales como primer paso para la evaluación de la existencia de relaciones entre ellas y en qué grado. Los datos fueron agrupados según contacto bosque preparamero-páramo, bosque seco-bosque preparamero, selva nublada-bosque preparamero y arbustal xérico-bosque preparamero.

Las correlaciones lineales se realizaron utilizando un programa estadístico y seleccionando un nivel de significancia de $p < 0,05$. Se restringió la aceptación de relaciones entre variables a dos condiciones: a) Que el coeficiente de correlación se encuentre por encima de 0,85 o por debajo de -0,85 y b) Que el ajuste de la recta o curva sea estadísticamente significativa. Esta restricción responde a la cantidad de variables a incorporar en el modelo final, y que en la medida que sea menos estricta la selección, mayor será el error que se introduciría al final.

No se toman en cuenta las correlaciones entre las temperaturas y la ubicación altitudinal del límite ya que detrás de esta supuesta asociación subyace la regresión altitud-temperatura. Además, en este trabajo la ubicación del límite es respuesta a las interacciones entre las demás variables y no una variable más a considerar.

Adicional a los análisis de correlación, se realizaron evaluaciones visuales del comportamiento que pudieran presentar las variables generando gráficos de la forma XY, partiendo de que la visualización es una herramienta que permite esclarecer tendencias y es válido considerar que un grupo de datos puede ser “explorado” a través de distintas representaciones visuales, sin que pierdan validez las tendencias observadas.

5.2.4 Análisis Box Plot

Se realizaron gráficos de caja para visualizar separaciones entre los grupos de datos ($P < 0,05$), lo cual se hizo agrupando los valores de cada área de muestreo según el contacto al cual pertenecían para cada variable. Para el límite superior, si bien es el mismo límite bosque preparamero-páramo para las 79 ventanas, estas se agruparon según el límite inferior que le correspondía a la ventana.

La clasificación que desde un principio se adoptó para categorizar los contactos en: selva nublada-bosque preparamero, bosque seco-bosque preparamero y matorral xérico-bosque preparamero, es una clasificación basada solo en el contacto con el ecosistema, es decir, es artificial, ya que no está considerando ningún atributo inherente a los ecosistemas involucrados y aunque haga referencia a la disponibilidad hídrica de las zonas esta no se toma en cuenta como factor agrupador. Adicional a los gráficos se presentan los resultados de la ANDEVA aplicada para los valores de cada grupo.

5.2.5 Análisis multivariado

Partiendo de la gran cantidad de información generada y de la falta de correlaciones claras entre esta información, se optó por realizar un análisis de ordenamiento multivariado, el cual es una herramienta estadística que permite determinar, dentro de una gran cantidad de variables, en qué medida cada una de ellas contribuye a explicar un fenómeno determinado, en este caso, el límite del bosque.

Para realizar el ordenamiento se generaron 2 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.

Partiendo de la naturaleza de los datos, donde se reconoce que la distribución de los límites de contacto del bosque preparamero deben estar respondiendo, en márgenes estrechos, a óptimos en las variables consideradas, se seleccionó el

análisis canónico de correspondencia (CCA), en el cual se parte de que existe una respuesta unimodal de aparición del límite en función de las variables ambientales a lo largo de gradientes de las mismas variables (Jongman 1995). En el ordenamiento fue excluida la exposición ya que presenta valores “radiales” y en las evaluaciones previas no arrojó tendencias; así mismo fue incluido el valor numérico del lod2 que se obtuvo para la generación del mapa de clasificación de estacionalidad como variable adicional que permite cuantificar el grado de estacionalidad de las áreas de muestreo, donde mayores valores representan menor variación de las precipitaciones en el curso anual.

5.3 Resultados

5.3.1 Unidades de muestreo.

Se obtuvieron un total de 79 ventanas del contacto bosque preparamero-páramo como contacto superior, 62 ventanas de contacto selva nublada-bosque preparamero, 11 ventanas de contacto bosque siempreverde seco-bosque preparamero y 6 ventanas de contacto arbustal xérico-bosque preparamero. 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. Se presentan a continuación las ventanas de muestreo y su distribución a lo largo del bosque preparamero representado en MEA (figura 23).

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

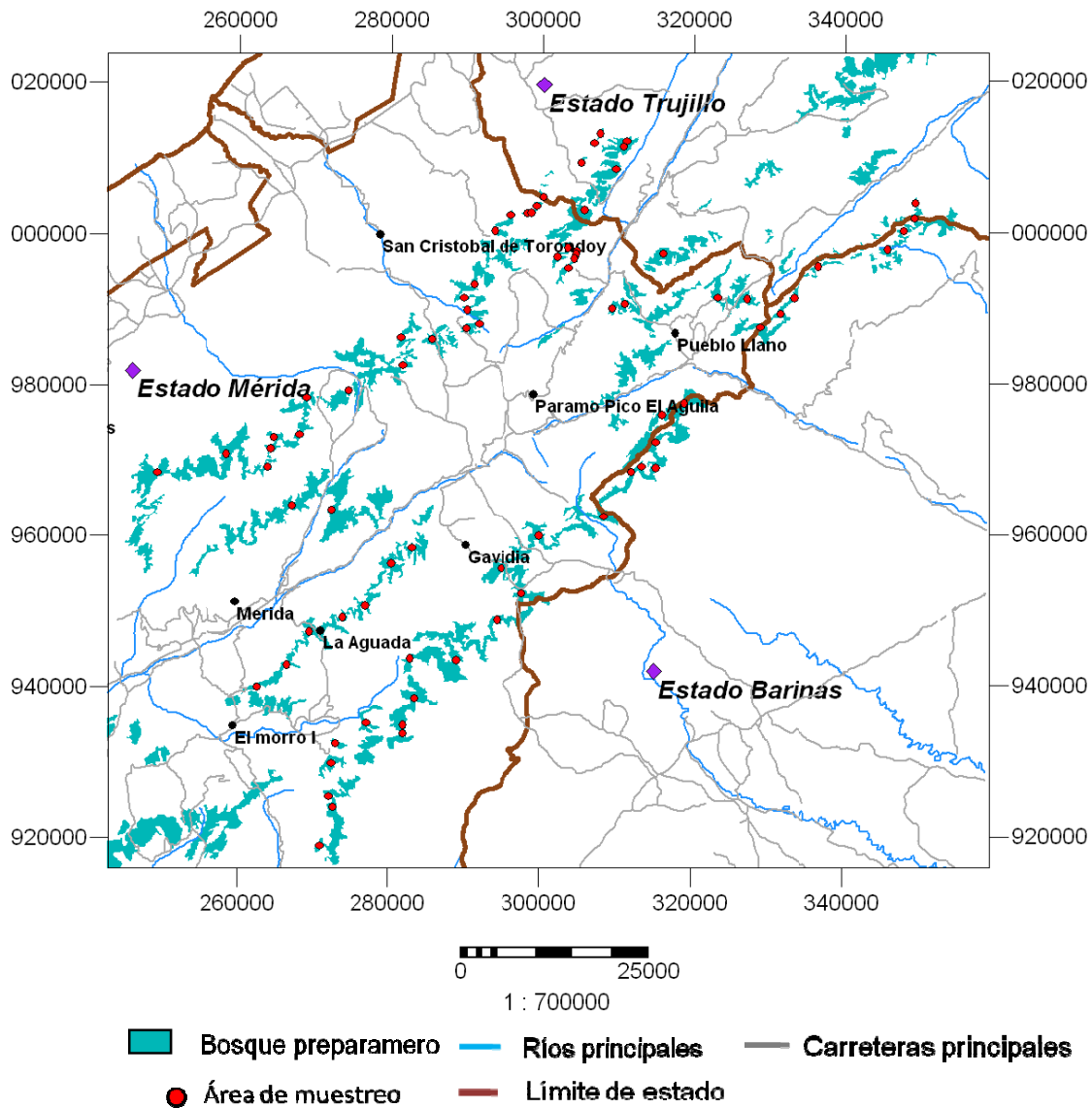


Figura 23. Áreas de muestreo seleccionadas. Nótese que se obvian las islas de bosque.

5.3.2 Extracción de información

En la tabla 5 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.

Tabla 5. Valores promedios de todas las variables consideradas

Contacto	Bosque preparamero- páramo (pp)	Selva nublada- bosque preparamero (sb)	Bosque seco-bosque preparamero (bb)	Arbustal xérico- bosque preparamero (xb)
Área total muestreada (Km2)	6,21	2,67	0,47	0,21
altitud	3320,87	2951,11	2862,82	2493,00
desvest	210,96	172,08	312,50	176,23
%c.v altitud	6,35	5,83	10,92	7,07
Temp media	8,66	10,72	11,18	13,33
desvest	1,17	0,95	1,78	0,98
%c.v temp media	13,51	8,86	15,91	7,31
Temp máxima	16,37	18,18	18,60	20,48
desvest	1,04	0,85	1,59	0,84
%c.v temp máxima	6,33	4,67	8,58	4,11
Temp mínima	2,88	5,08	5,54	7,83
desvest	1,25	1,01	1,94	1,02
%c.v temp mínima	43,34	19,97	34,95	12,99
Exposición	183,72	178,39	172,18	82,33
desvest	82,49	93,97	87,96	19,33
%c.v aspecto	44,90	52,68	51,08	23,47
precipitación	1231,90	1271,02	1098,45	1157,17
desvest	177,35	197,08	151,21	44,38
%c.v precipitación	14,40	15,51	13,77	3,84
Pendiente Grados	28,43	31,02	31,55	28,33
desvest	6,02	5,94	6,14	7,47
%c.v pendiente	21,19	19,16	19,46	26,38

5.3.3 Análisis de Correlación y dispersión de puntos.

En las tablas 6, 7, 8 y 9 se muestran los coeficientes de las 84 correlaciones lineales obtenidas entre las variables ambientales para cada tipo de contacto.

Tabla 6 Correlación variables del contacto Bosque preparamero-Páramo. * Correlación significativa entre los pares de variables. *** Correlación altamente significativa. P < 0,050 N= 79

Correlación variables del contacto Bosque preparamero-Páramo	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							

Tabla 7 Correlación variables del contacto Selva nublada-Bosque preparamero. * Correlación significativa entre los pares de variables. *** Correlación altamente significativa. P < 0,050 N= 62

Correlación variables del contacto Selva Nublada-Páramo	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							

Tabla. 8 Correlación variables del contacto Bosque siempreverde seco-Bosque preparamero. * Correlación significativa entre los pares de variables. ***correlación altamente significativa. P < 0,050 N= 11

Correlación variables del contacto Bosque siempreverde seco-Páramo	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							

Tabla. 9 Correlación variables del contacto Arbustal montano xérico-Bosque preparamero. * Correlación significativa entre los pares de variables. *** Correlación altamente significativa. P < 0,050 N= 6

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							

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 la regresión altotérmica ya señalada y comentada en capítulos anteriores. Para las demás variables que arrojaron significancia en la correlación lineal, se tiene que el valor de r está fuera de los límites de restricción señalados al comienzo del capítulo ($-0,85$ y $0,85$). Se cuenta entonces con el ajuste de curvas a partir de los gráficos de dispersión de puntos.

Se realizaron gráficos de dispersión para todas las combinaciones entre variables para cada contacto obteniéndose 21 gráficos por contacto, para un total de 84 gráficos de dispersión. La gran mayoría de los gráficos no mostró tendencia alguna, especialmente los que involucraron variables topográficas, y no fue posible ajustar ninguna curva que satisficiera la dispersión de los puntos.

Reconociendo como fundamento teórico que la precipitación debe estar jugando un papel importante, tal como lo señala Monasterio (1980) al exponer que para el caso de las vertientes húmedas el bosque preparamero alcanza mayores elevaciones que en las vertientes secas, vale indagar qué otra evaluación se puede realizar considerando las precipitaciones.

Partiendo de este hecho y de que se deben reconocer de alguna forma patrones en la distribución del límite altitudinal del bosque preparamero y las precipitaciones, se evaluaron con más detalle los gráficos de dispersión de la ubicación del límite y las precipitaciones (Figuras 24 y 25)

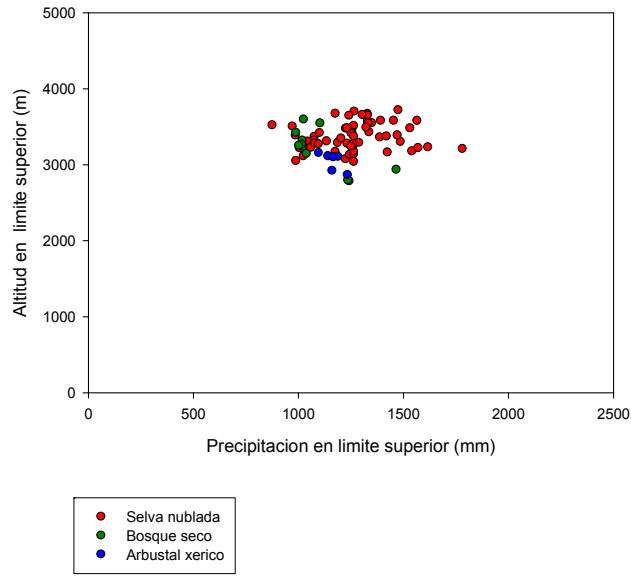


Figura 24. Altitud de ventanas de muestreo y precipitaciones en contacto superior. Se logra observar cierta separación entre contactos.

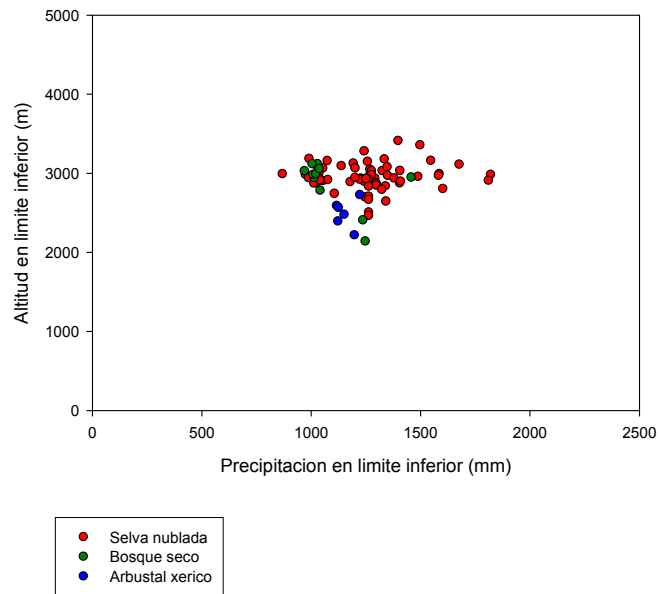


Figura 25. Altitud de ventanas de muestreo y precipitaciones en contacto Inferior. Se logra observar cierta separación entre contactos.

En estos gráficos 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. Esto llevó a preguntarse qué variable ambiental pudiera estar explicando este fenómeno y que no haya sido incluida en las correlaciones ya realizadas.

Se procedió entonces a graficar los contactos pero agrupados esta vez según sus exposiciones, para lo que se generó una nueva clasificación que agrupó las exposiciones en 3 grupos, A, B y C de acuerdo a la siguiente figura:

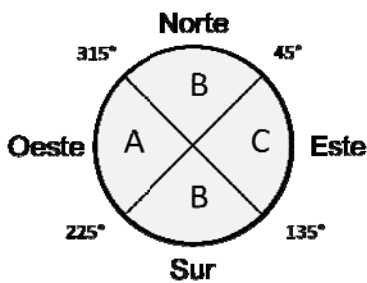


Figura 26 Clasificación de exposiciones de acuerdo al valor en grados que toman en el mapa de exposiciones. Nótese que no se diferencian las exposiciones Norte y Sur.

Se opta por no realizar distinciones entre exposiciones Norte o Sur debido a que estas exposiciones tienen muy poco significado ecológico en los trópicos ecuatoriales, mientras que las exposiciones Oeste y Este al presentar diferencias importantes en la cantidad de radiación que reciben las laderas, si juegan un papel ecológico importante, encontrándose que las laderas expuestas al Este reciben mayor insolación que las Oeste, resultando esta últimas mas húmedas (Monasterio y Reyes 1980, Monasterio y Azocar 1980).

El resultado obtenido de los gráficos de las exposiciones no aportó información ya que las exposiciones se comportaron indiferentes al tipo de contacto que representan. Las nubes de puntos se mezclan entre sí sin aportar información que sugiera restricciones de valores de precipitación según la exposición (figuras 27 y 28)

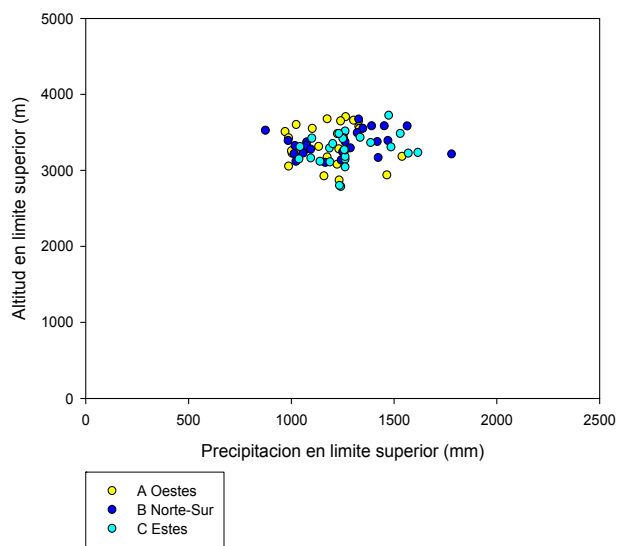


Figura 27. Dispersión de puntos de ubicaciones altitudinales y precipitaciones según la exposición para el contacto superior.

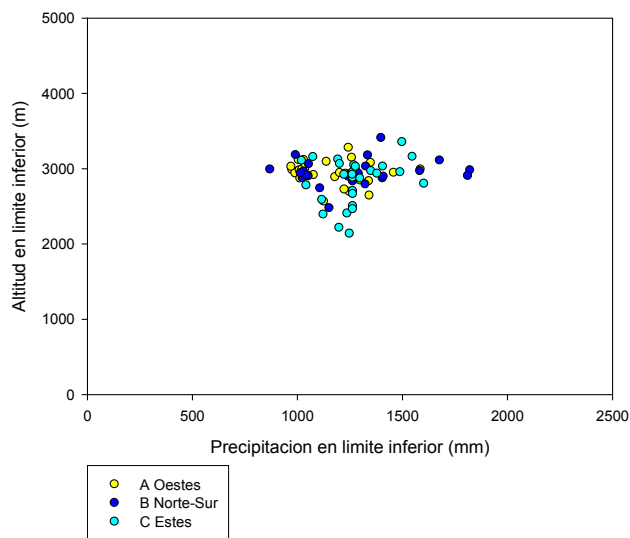


Figura 28. Dispersión de puntos de ubicaciones altitudinales y precipitaciones según la exposición para el contacto inferior.

Observando esto, surgió la interrogante hasta qué punto estas exposiciones reflejan efectivamente la influencia de la exposición sobre la ventana considerando que no todas ellas se encuentran en la misma situación o ubicación relativa entorno a la cordillera, en otras palabras, una misma exposición Este puede ser externa a la cordillera mirando hacia Los Llanos o interna a la cordillera, justo en el valle. Para dilucidar estas diferencias se realizó una clasificación de las ventanas de muestreo en las 4 situaciones o ubicaciones relativas tal como se ilustra en las figuras 29 y 30.

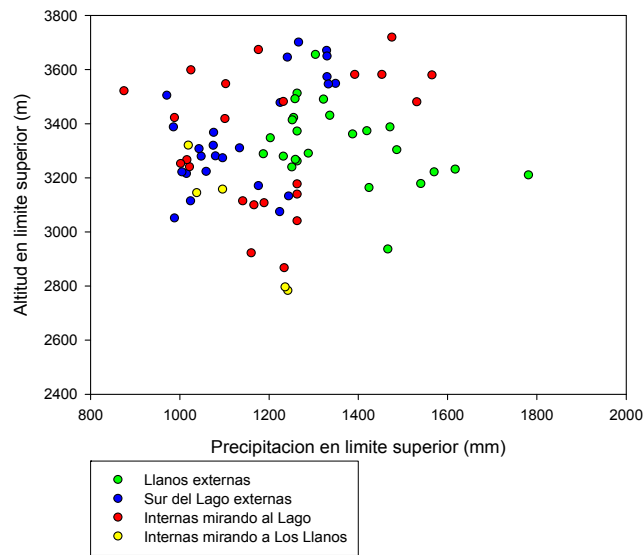


Figura 29. Ubicación altitudinal de ventanas de muestreo superior y precipitación respectiva según su ubicación relativa

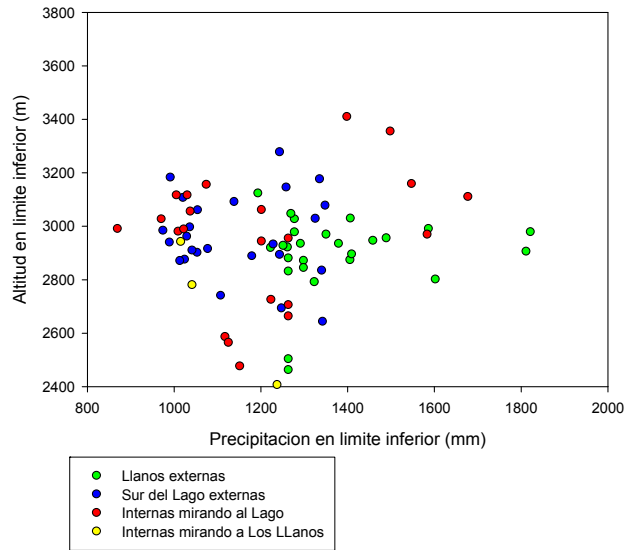


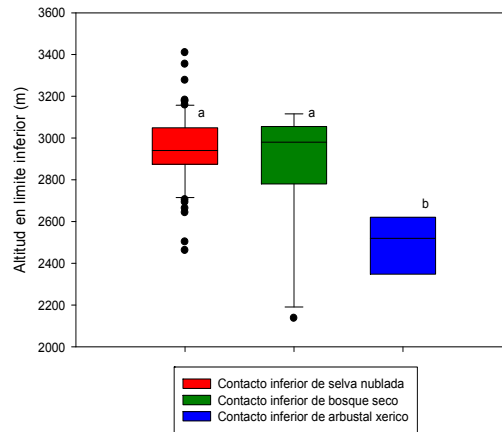
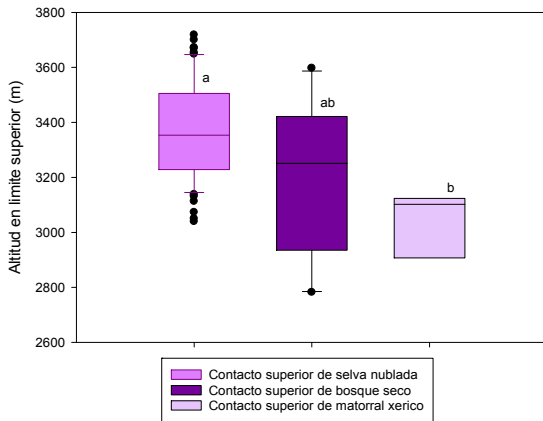
Figura 30. Ubicación altitudinal de ventanas de muestreo inferior y precipitación respectiva según su ubicación relativa.

Evaluando la clasificación realizada según ubicaciones relativas, 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 correspondientes a las ventanas externas a la cordillera, orientadas hacia Los Llanos.

Luego de realizada esta visualización de relaciones entre variables, es necesario apoyo estadístico para corroborar que efectivamente las separaciones de datos que se han hecho visibles hasta ahora, son efectivamente significativas; para ello se recurrió a la realización de gráficos de caja o “*boxplots*”.

5.3.4 Análisis Box Plot

Se presentan a continuación los gráficos correspondientes para las variables precipitación, pendiente, ubicación altitudinal, temperatura media y precipitaciones según ubicación relativa para los tres diferentes contactos en las dos situaciones de límite superior e inferior. No se presentan temperaturas máximas ni mínimas porque el comportamiento es igual al de las medias. En esta parte es pertinente señalar que aun cuando todos los contactos superiores son bosque preparamero-páramo se hace una separación de grupos según sean sus contactos inferiores.

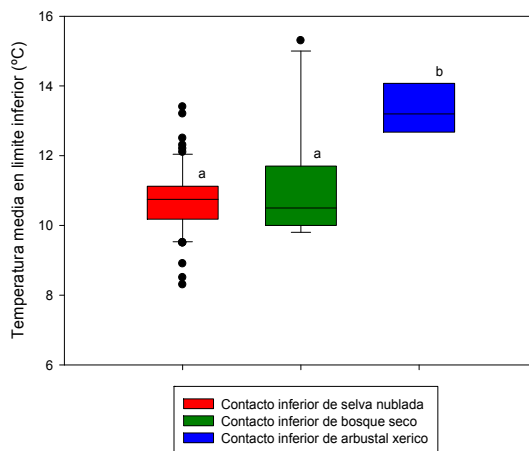
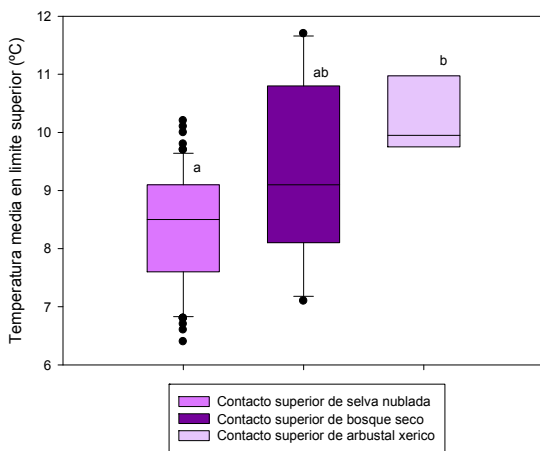


A.

B.

Figura 31. Altitudes de contactos clasificados según su respectivo contacto inferior. Nótese como el bosque seco presenta una ubicación altitudinal intermedia en el límite superior A).

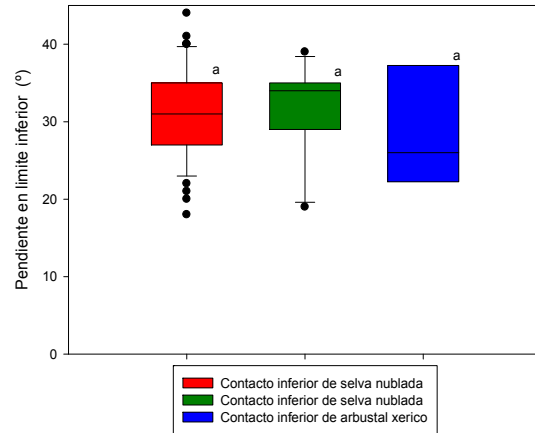
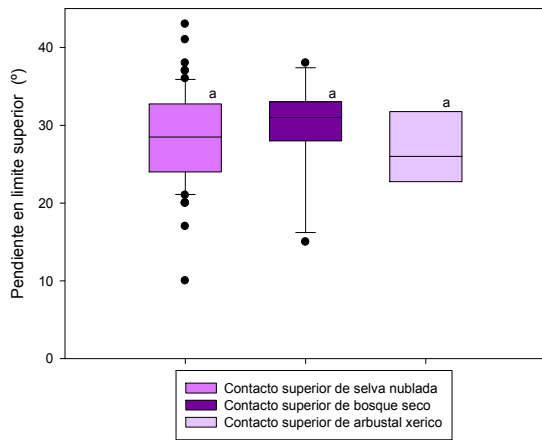
El arbustal xérico es quien presenta diferencias en su ubicación altitudinal tanto superior como inferior, igual que las temperaturas; las cuales podríamos ver como efecto de la altitud (Figuras 31 y 32). Las precipitaciones se diferenciaron en ambos casos para la selva nublada y el bosque seco



A.

B.

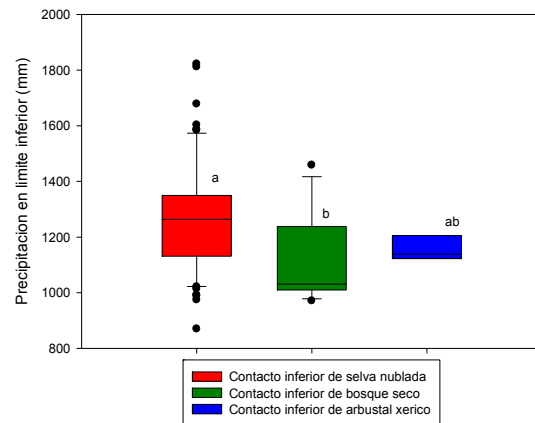
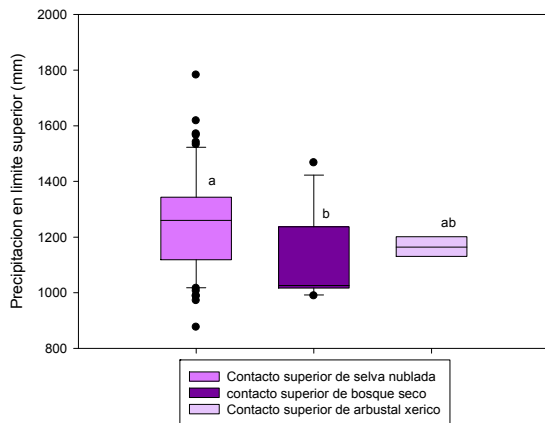
Figura 32. Temperaturas medias en A) límite superior y B) límite inferior. Para el límite superior el bosque seco presenta temperaturas intermedias.



A.

B.

Figura 33. Pendientes en A) límite superior y B) límite inferior. No se observaron diferencias en ninguno de los casos.

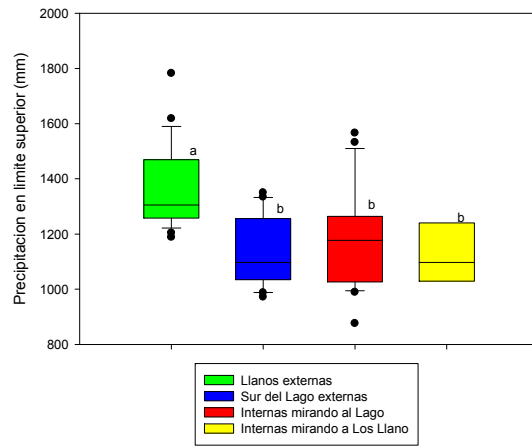
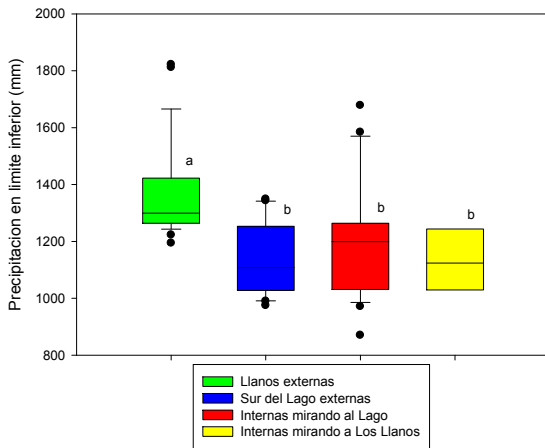


A.

B.

Figura 34. Precipitaciones en A) límite superior y B) límite inferior. No se observaron diferencias para el arbustal xérico.

Retomando los resultados de los gráficos de dispersión, donde se evidencia una separación de los datos de precipitación para los muestreos ubicados hacia la vertiente llanera de la cordillera, se planteó realizar gráficos de caja para tales supuestas separaciones (figura 35).

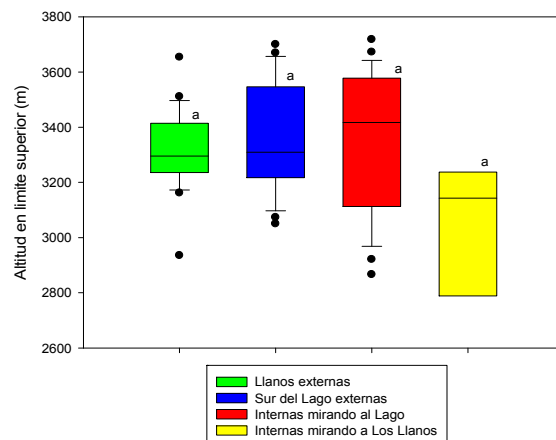
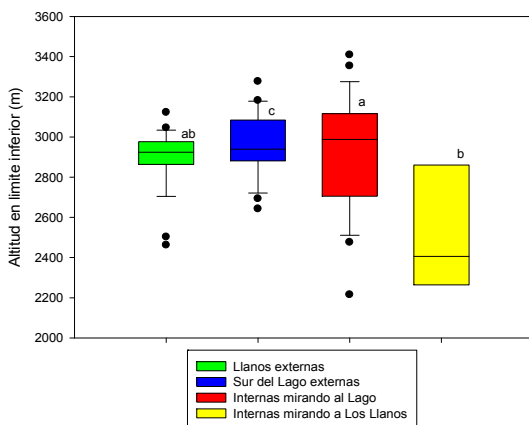


A.

B.

Figura 35. Precipitaciones en A) límite superior y B) límite inferior según sus ubicaciones relativas. Las ubicaciones expuestas hacia Los Llanos presentan diferencia en el monto de precipitaciones.

Las ubicaciones en la vertiente llanera presentan mayores valores de precipitación tanto en límite inferior como superior, mientras que para la altitud en el límite inferior se obtuvo que las diferencias se encuentran para todas las ubicaciones salvo para las ubicaciones de vertiente llanera, y para el límite superior no hay diferencias (figura 36).



A.

B.

Figura 36. Altitud de ubicación del bosque preparamero en A) imite superior y B) límite inferior. No existen diferencias para las ubicaciones llaneras.

5.3.5 Análisis multivariado

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 e lod₂.

Para el contacto superior se observa que el primer eje absorbe 46,5% de la variabilidad y se encuentra asociado al gradiente altotérmico (figura 37). 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 3 primeras variables se obtuvo que la temperatura mínima ocupa el primer lugar, la temperatura media el segundo y la precipitación el tercero; pero 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 lod₂ en tercero.

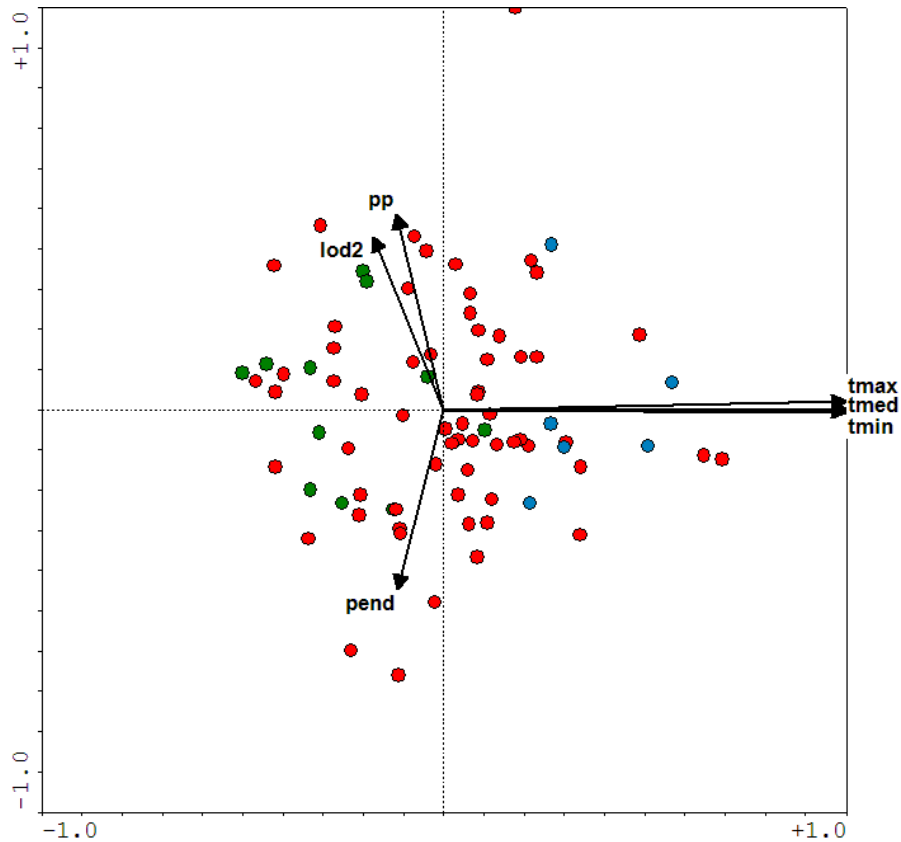


Figura 37. Primer y segundo eje de ordenamiento del límite superior. Nótese que los vectores de precipitación y pendientes son opuestos. Los círculos rojos son los contactos superiores con contacto inferior de selva nublada, los verdes con el bosque seco y los azules con el arbustal xérico.

En el contacto inferior (figura 38) 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, lod_2 en segundo y pendiente en tercero.

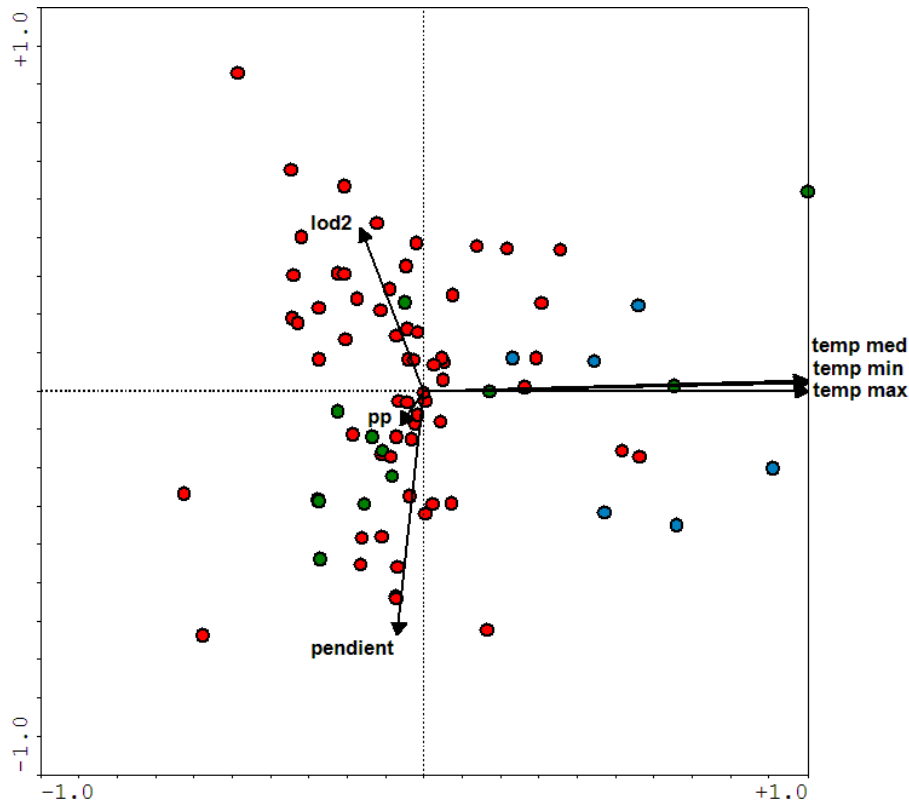


Figura 38. Primer y segundo eje de ordenamiento para el contacto inferior. Nótese como la estacionalidad (lod2) está asociada al segundo eje. Los círculos rojos son los contactos superiores con contacto inferior de selva nublada, los verdes con el bosque seco y los azules con el arbustal xérico.

5.4 Discusión

La exploración realizada de las variables consideradas en el trabajo, si algo han arrojado de manera clara ha sido heterogeneidad. La gran gama de condiciones bajo las cuales se presenta el bosque preparamero 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 de enfriamiento altotérmico. Aparte de esta relación, la detección de otras asociaciones entre variables no es tan clara y los recursos utilizados, aun cuando aportaron la

posibilidad de realizar una exploración a fondo de los datos, no permitieron el desarrollo de ecuaciones o funciones matemáticas predictoras de la ubicación del límite en función de todas las variables estudiadas.

Aun así, se consideró que cualquier evaluación que pudiera agrupar o separar condiciones del límite sería válida pues estaría generando rangos de variables entre los cuales el límite aparece. En este aspecto se observó la separación de las vertientes, en particular de las vertientes llaneras, del resto del grupo, que evaluando luego en detalle a qué obedece tal separación, hay indicios que es debido a la estacionalidad que presentan.

Volviendo a los resultados obtenidos en los box plots para las ubicaciones relativas se tiene que si la precipitación para tres tipos de contactos es igual (figura 35), pero esos contactos difieren en altitud (figura 36) y el único grupo que difiere en precipitación no presenta diferencias significativas en la altitud, debe existir otro factor que pudiera estar asociado a las precipitaciones y que esté generando tal separación y 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 (figura 39) esto debido a que es la estacionalidad la que está asociada al segundo eje (figura 38) y además está desplazando a las precipitaciones en importancia.

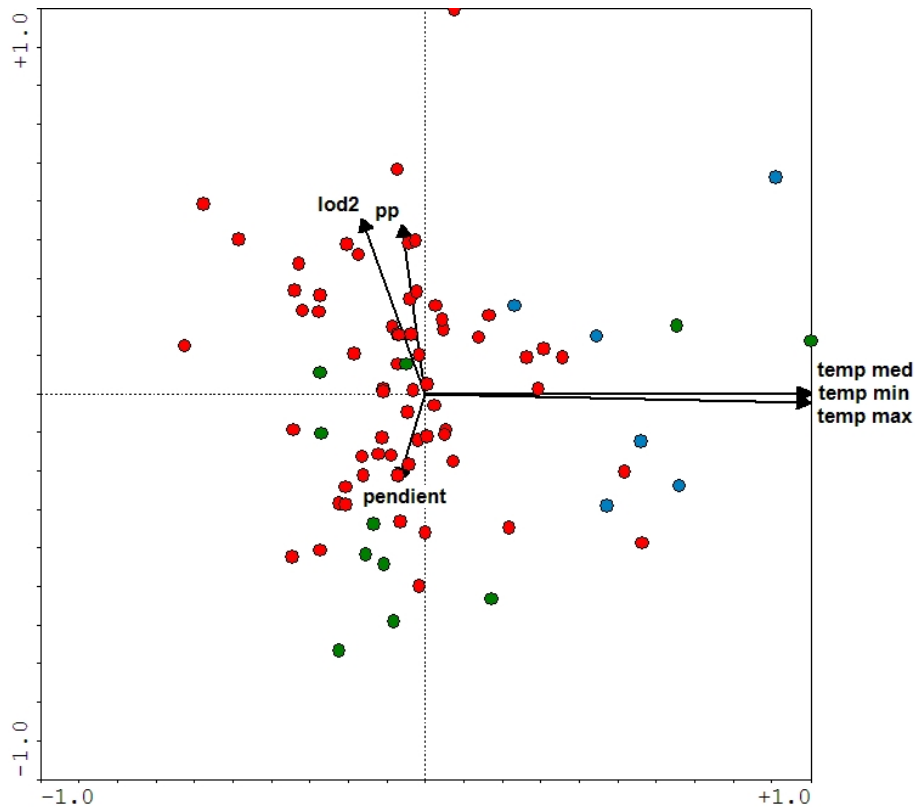


Figura 39. Primer y tercer eje de ordenamiento para el límite superior. Nótese como la precipitación responde más al tercer eje que al segundo de la figura 81. Los círculos rojos son los contactos superiores con contacto inferior de selva nublada, los verdes con el bosque seco y los azules con el arbustal xérico.

El orden de importancia de las variables involucradas en el ordenamiento brindan una buena aproximación de qué parámetros considerar para la generación del modelo, variables cuya selección se ve reforzada al considerar que las demás variables que presentaron menor orden de importancia no arrojaron ni buenas correlaciones ni tendencia claras en los gráficos de dispersión de puntos.

La importancia de las variables varía según el contacto; siendo para el caso superior la temperatura mínima en primer lugar, la precipitación en segundo y la estacionalidad de tercero. Partiendo del hecho de que el límite superior es la

transición hacia vegetación de páramo, adaptada a bajas temperaturas, resulta adecuado 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 arrosetada 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 del agua de retener el calor, generando mayores temperaturas mínimas. Caso contrario donde haya sequía y no exista agua que pueda retener calor.

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. Entendiendo la estacionalidad como disponibilidad hídrica el razonamiento expuesto para el límite superior aplica para este caso igual, pero las implicaciones que conlleva serían diferentes.

La estacionalidad y el hecho de que la misma conduce a respuestas ecológicas diferentes que los montos totales precipitación por sí mismos 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.

El límite inferior se caracteriza por ser la transición hacia una vegetación arbórea de poco porte y achaparrada como consecuencia del daño sufrido por las bajas temperaturas. Durante épocas secas las temperaturas nocturnas suelen ser mucho más bajas y aumenta el número de noches con heladas, lo que ya ha sido reportado con anterioridad como una de las principales causas de daño a la vegetación no adaptada a tales temperaturas (Hoch, G. y Körner, Ch., 2003 y 2005 Körner, Ch. 1998, Körner, Ch. y Paulsen, J. 2004), daño que se ve reflejado

en el aspecto achaparrado de la vegetación arbórea, como consecuencia del deterioro que sufren las estructuras responsables del crecimiento de la planta como yemas, ápices y raíces, deterioro que también puede ser visto como una atrofia de tejidos que conduce al anormal desarrollo o incluso ausencia del mismo, en la formación de estructuras de soporte como tallos, generando achaparramiento u atrofia de órganos reproductivos como flores, que permitan la dispersión y posterior establecimiento de plántulas.

Este daño al estar directamente asociado a las bajas temperaturas, que a su vez se asocian a los períodos de sequía, era de esperarse ocurriese precisamente en aquellos lugares donde las sequias sean más marcadas y prolongadas; de allí que se pueda explicar la importancia que toma el lod2 en los ordenamientos multivariados.

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 lod2 parece ser la variable que está determinando con más fuerza la aparición del límite inferior del bosque preparamero, límite en el cual comienzan a evidenciarse los aparentes daños en la vegetación ya comentados, como resultado de las bajas temperaturas a su vez, resultado de la baja disponibilidad de agua. La pendiente también juega un papel importante en el ordenamiento del límite inferior, asociada precisamente a la disponibilidad de agua, donde a mayores pendientes se encontró que el lod2 disminuye.

Aun cuando ambas variables no se pueden analizar en conjunto o establecer relaciones directas entre ellas, pues una de ellas se obtuvo con datos meramente climáticos y la otra a partir de información topográfica, 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 ya comentado; fenómeno reportado en la literatura (Körner y Paulsen 2004)

como una de las posibles causas de aparición del límite: bajas temperaturas en suelo que afectan las raíces.

Con respecto al límite superior, la importancia de las variables en los ordenamientos refleja un poco lo expuesto anteriormente en cuanto al papel que juegan las bajas temperaturas en el potencial daño que pueden ocasionar a estructuras vegetales. Al encontrarse que la temperatura mínima es la variable con mayor importancia en la distribución del límite, se sustenta la idea de que son exactamente las temperaturas mínimas las que determinan el grado de daño que puede sufrir la vegetación y quedar imposibilitada de alcanzar elevaciones mayores.

La precipitación, en cambio, resultó ser la segunda variable en importancia seguida del lod2, 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.

Temperaturas que desde distintos puntos de vista insisten en ser las responsables de la aparición del límite actuando de distintas formas a lo largo del gradiente altitudinal; una primera forma en el límite inferior generando atrofia y daño en tejidos de sostén en plantas leñosas y una segunda forma en el límite superior impidiendo el desarrollo de la vegetación ante daños mucho mas marcados en tejidos vegetales.

Aunque ninguna de estas afirmaciones pueden ser concluyentes, de alguna manera están apoyando las ideas principales de años de investigaciones realizadas en este aspecto, donde a nivel global la variabilidad de condiciones en las que aparece el limite tanto en ubicaciones tropicales como extratropicales son numerosas y ha resultado sumamente complicado el poder establecer comparaciones entre limites en tales ubicaciones tan contrastantes; pero si han coincidido es en presentar temperaturas en suelo 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.

Resalta que en cuanto a las limitaciones en el crecimiento debido a limitaciones en la adquisición de carbono, estudios conducidos por Körner y demás colaboradores (1998, 2003, 2005) han dejado abierta la posibilidad de que el daño no puede ser atribuido enteramente a este hecho ya que las deficiencias de carbono y demás fotoasimilados se hacen palpables en una etapa ya avanzada de crecimiento de la planta y que sería entonces el establecimiento y desarrollo de la vegetación, la principal barrera para el avance del bosque y aparición del límite.

Ya establecidas las variables que con mayor fuerza están asociadas a la aparición del límite, es posible entonces dar inicio a la modelización de la ubicación espacial del mismo con ayuda del sistema de información geográfica que desde un principio permitió generar los mapas de distribución de las variables involucradas en el trabajo. El límite resultante será luego presentado en distintos escenarios de cambio climático previstos por el IPCC.

Capítulo 6. Modelo de distribución del borde de contacto bosque-páramo y escenarios de cambio climático.

6.1 Introducción.

El alto grado de heterogeneidad y complejidad en la naturaleza impide que se puedan realizar predicciones exactas a través de modelos de todos los aspectos que conciernen al funcionamiento de un ecosistema, sin embargo se puede llegar a representaciones cercanas a la realidad. La realización de un modelo, de acuerdo a Levins (1966) en Guisan y Zimmermann (2000), debe considerar al menos 2 de 3 principios fundamentales: generalidad, realidad y precisión; principios que llevan a la distinción de 3 tipos de modelos: analíticos, mecanísticos y empíricos.

Los modelos analíticos se enfocan en la generalidad y la precisión, con predicciones basadas en una realidad simplificada o limitada; los mecanísticos enfocados en la realidad y generalidad, donde las predicciones que generan se basan en relaciones causa-efecto; y por último los modelos empíricos con enfoque en la precisión y la realidad y cuyas predicciones se limitan a la descripción de un proceso a través de teorías o fundamentos matemáticos (Guisan y Zimmermann 2000). La designación de un modelo dentro de alguno de los tipos de modelo descritos no es tan obvia, ya que las herramientas que se utilizan para la generación del modelo, así como el objeto de estudio o fenómeno a modelar pueden no presentar límites claros entre unas y otras.

Las evaluaciones realizadas a lo largo del presente trabajo para generar un modelo de distribución potencial del bosque preparamero, si bien comenzaron dentro de evaluaciones estadísticas propias de un modelo empírico, culminaron con la obtención de resultados que condujeron al establecimiento de relaciones causa-efecto para dar respuesta a la interrogante de cuales variables ambientales (causa) determinan la aparición del límite (efecto); resultados que apoyan la idea de que el modelo a presentar en este trabajo puede ser catalogado como mecanístico.

Con las *causas* ya establecidas y evaluados los *efectos* se pretende ahora en este capítulo presentar el modelo de distribución potencial del bosque preparamero, considerando el principio que se ha mantenido en el trabajo, que la distribución de la vegetación responde a gradientes ambientales, en los que se pueden reconocer óptimos para el establecimiento y desarrollo de determinados tipos de vegetación.

Existen estudios realizados en este aspecto en los que se considera la actual distribución geográfica de especies vegetales y las condiciones ambientales propias de tal área de distribución, para predecir ante cambios en esas condiciones ambientales cuál sería la nueva distribución de la especie (Hijmans y Graham 2006). Estos estudios se aplican a través de lo que se conoce como *Modelos de clima en sobres* o CEM por sus siglas en inglés (Climate envelope models).

Estos modelos son generados a partir de cálculos generados por programas especializados en los que se considera la distribución de las variables consideradas y hasta el 90% de los valores de esas variables en los cuales hay ocurrencia de la especie.

Aun cuando estos modelos tratan en principio especies, el punto de partida que consideran puede ser aplicado a un ecosistema, donde el funcionamiento del mismo viene dado por las condiciones ambientales en las que ocurre, condiciones ambientales que presentaran óptimos para el funcionamiento del mismo.

En el desarrollo de este trabajo, ante la escasez de correlaciones directas y claras entre las variables ambientales y la ubicación del bosque preparamero, y los resultados de los ordenamientos multivariados donde se reconoce la importancia de 3 variables para cada límite, tanto superior como inferior, se plantea utilizar los principios de los modelos CEM para la evaluación de los rangos de variables distribuidas espacialmente en las cuales hay presencia del bosque a través de la evaluación visual del comportamiento de las variables involucradas.

6.1.1 Escenarios de cambio climático.

Debido a la incertidumbre que representa el cambio climático, se hace referencia a los efectos que pudiera producir bajo el nombre de *escenarios*. Son 4 escenarios en total y todos surgen de un reporte especial de escenarios de emisión de gases (SRES por sus siglas en ingles) propuestos por el IPCC en el año 2000, donde se presentan distintas propuestas de desarrollo socioeconómico, con especial referencia a las distintas tasas de producción de gases de efecto invernadero y donde se distinguen básicamente 2 tendencias de desarrollo divergente; una que varía entre valores netamente económicos a fuertes valores ambientales y otra que varía entre un mundo con un aumento en la globalización por un extremo y la regionalización por otro. Para generar el modelo de distribución del contacto bosque-páramo en este trabajo se considerará el escenario *optimista* (ver tabla 10 y figura 46).

Tabla 10. Características generales de los cuatro modelos principales generados por el SRES. Nótese las diferencias en las tasas de crecimiento y orientación económica. Fuente IPCC Data Distribution Center (2000)

Escenario	Características
A1	Mundo con rápido crecimiento económico y crecimiento poblacional que declina a mediados del siglo. Introducción de tecnologías cada vez más eficientes.
A2	Mundo con crecimiento poblacional constante pero más lento con valores económicos orientados regionalmente.
B1	Misma población que en A1 pero con la introducción de tecnologías más limpias y eficientes.
B2	Énfasis en soluciones locales a aspectos económicos, ambientales y sociales. Desarrollo económico moderado y crecimiento poblacional constante.

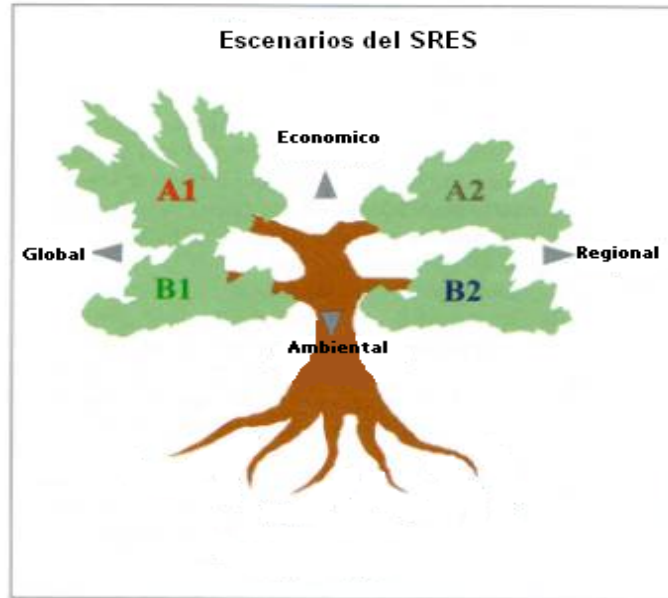


Figura 46 Las distintas concepciones o escenarios de desarrollo socioeconómico en las cuales se basa el SRES para desarrollar los distintos modelos de emisión de CO₂ bajo dos tendencias divergentes. Modificado del IPCC Data Distribution Center (2000)

Este escenario optimista proviene de los modelos UKTR desarrollado por la United Kingdom Meteorological Office (UKMO) y el CCC-EQ del Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (CCCMA), modelos que 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.

6.2 Metodología.

6.2.1 Variables asociadas al límite.

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 3 variables más importantes. Para poder realizar la evaluación, los valores que tomó el índice ombrotérmico I_{od2} para cada área de muestreo fueron agrupados en clases (tabla 10).

El agrupamiento en clases se realizó según los criterios que sigue Rivas-Martínez (2004) para clasificar en pluviales y pluviestacionales donde 2,5 es el valor crítico (ver capítulo 4). Para clasificar valores por debajo o por arriba de este valor 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.

Una vez agrupados los índices, se realizaron gráficos XY donde tanto abscisas como ordenadas correspondían a las variables que resultaron importantes para ambos límites. Para el caso del límite inferior se realizó un gráfico con los valores de pendiente y temperaturas medias de las áreas de muestreo, donde a cada muestreo se le señaló a qué clase de lod2 correspondía.

Para el límite superior se repitió el procedimiento pero considerando en los ejes de coordenadas la precipitación y la temperatura mínima. Se optó por agrupar clases en función de los valores del lod2 por la importancia que tuvo esta variable en los ordenamientos y por ser común para ambos límites.

6.2.2 Modelos “caja”.

Una vez graficados, se seleccionaron los rangos de las variables representadas en las coordenadas entre los cuales se encontraban restringidas las clases del lod2, seleccionando tales rangos a manera de cajas. Se procuró incluir dentro de las cajas la mayor cantidad de puntos de una misma clase, obviando aquellos puntos que distasen mucho del agrupamiento para minimizar error.

Importante resaltar que cada punto que expresa el valor que toma el lod2 restringido entre valores de temperatura media, mínima, pendiente y temperatura, representala ubicación del área de muestreo, en otras palabras, la ubicación del límite.

6.2.3 Modelo de distribución potencial del límite bosque-páramo.

Partiendo de los mapas de distribución de las variables que se generaron para este trabajo, se señalaron en el SIG, a través de un recálculo de mapa, los valores

de las variables en cuestión entre las cuales existe restricción de valores de lod2. Este nuevo cálculo de mapa permite que el programa delimite espacialmente los lugares donde se cumplen las condiciones enmarcadas por las cajas.

El error se calculó de acuerdo al método propuesto por Congalton (1991), utilizando una matriz de error; la cual es el arreglo numérico de números de pixeles asignados al objeto de la evaluación (bosque preparamero) de acuerdo al número de pixeles ya reportados para dicho objeto, en este caso el bosque preparamero reportado en el MEA.

6.2.4 Mapas de distribución de variables en escenarios de cambio climático optimista.

A partir de los mapas de distribución de temperaturas y de precipitación, se generó la información necesaria para modelar el bosque preparamero bajo el mismo escenario de emisión de gases 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.

Para expresar espacialmente esta información se partió del mapa de temperaturas medias y mínimas, los cuales 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.

6.2.5 Mapas de distribución potencial del bosque preparamero en escenarios de cambio climático.

Se recalculó el mapa de patrón de distribución actual del bosque preparamero, pero introduciendo los mapas de temperatura y precipitación 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.

6.3 Resultados

6.3.1 Variables asociadas al límite.

La clasificación de los valores de lod2 se muestra a continuación:

Tabla 11. Intervalos seleccionados para agrupar los valores de lod2 en clases. No todos los intervalos están incluidos en la clasificación de Rivas -Martínez

Clase	Valor de lod2	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*

*Esta clasificación no abarca la totalidad del intervalo.

6.3.2 Modelos “caja”

Se muestra la evaluación visual realizada de las variables más importantes asociadas al límite resultado de los ordenamientos multivariados.

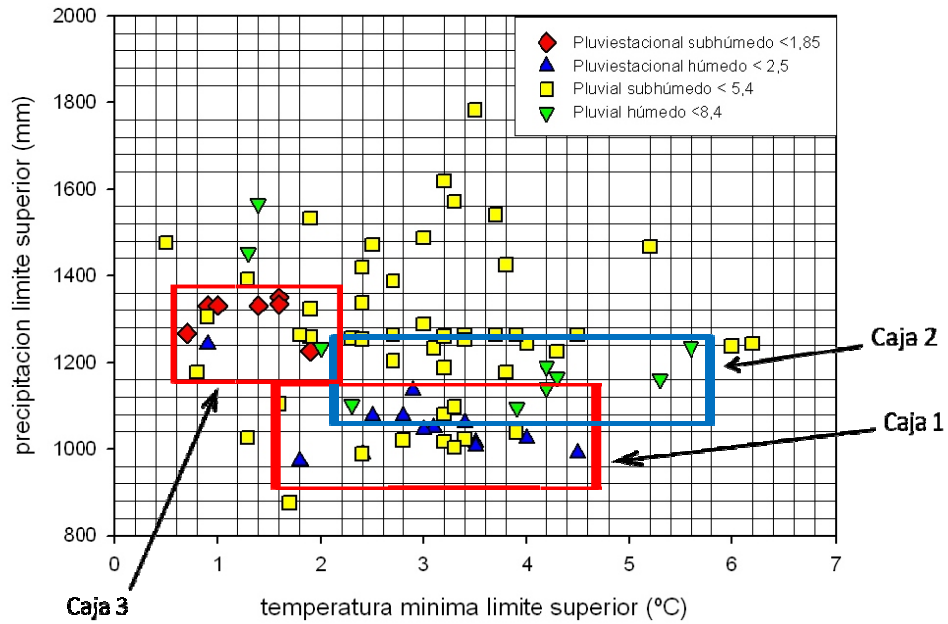


Figura 40. Evaluación de la distribución de las clases de lod2 y de su agrupamiento en caja para el límite superior. Se procuró incluir la mayor cantidad de puntos y dejar fuera aquellos que pudieran introducir ruido.

Se puede observar que para el caso del límite superior (figura 40), que existe una marcada variabilidad entorno a las temperaturas y la precipitación registrada, sin embargo fue posible separar los cuatro grupos de estacionalidades en cajas de varios tamaños y superpuestas entre sí. La figura 40 sólo presenta 3 grupos en cajas para su mejor interpretación visual.

Para el límite inferior (figura 41) se observa que la dispersión en torno a las variables es menor, particularmente para las temperaturas medias. De igual manera se pudieron seleccionar las 4 cajas correspondientes a los grupos de estacionalidad.

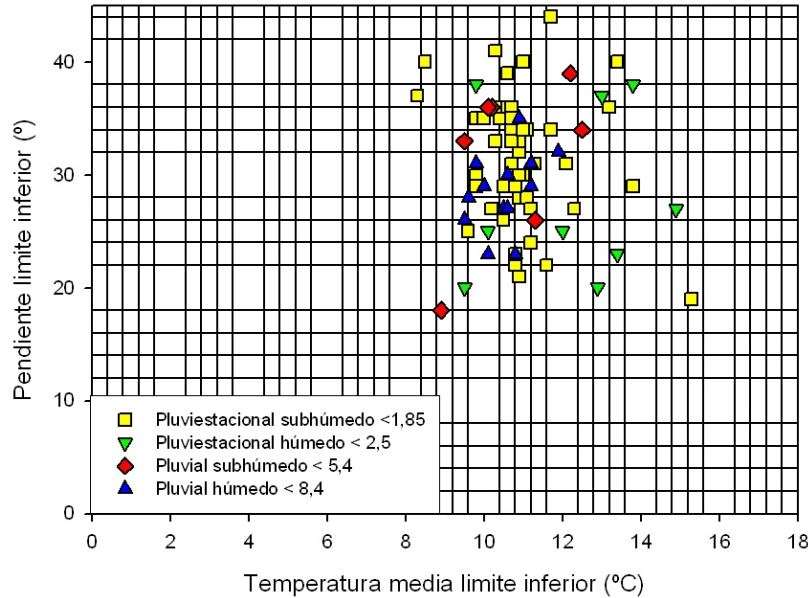


Figura 41. Evaluación de la distribución de las clases de lod2 y de su agrupamiento en caja para el límite inferior. La variabilidad es más marcada en las pendientes que en las temperaturas.

Sobre estos gráficos se evaluaron los rangos entre los cuales se restringe la aparición del límite, tratando de visualizar el arreglo de los puntos en “cajas”. Se generaron 4 cajas sobre cada visualización en las figuras 40 y 41; no se muestran todas por cuestiones de espacio y para permitir una mejor visualización.

6.3.3 Modelo de distribución potencial del límite bosque-páramo.

Se presenta el modelo de distribución potencial de la vegetación de bosque preparamero (Figura 42), el cual, evaluado con el mapa de Ecosistemas de Los Andes de Chacón-Moreno *et al* (2008), a través de la matriz de error, presentó una precisión de modelización de 57,4%.

La matriz de error (tabla 12) también arrojó una precisión general de 96% y fiabilidad de 24%.

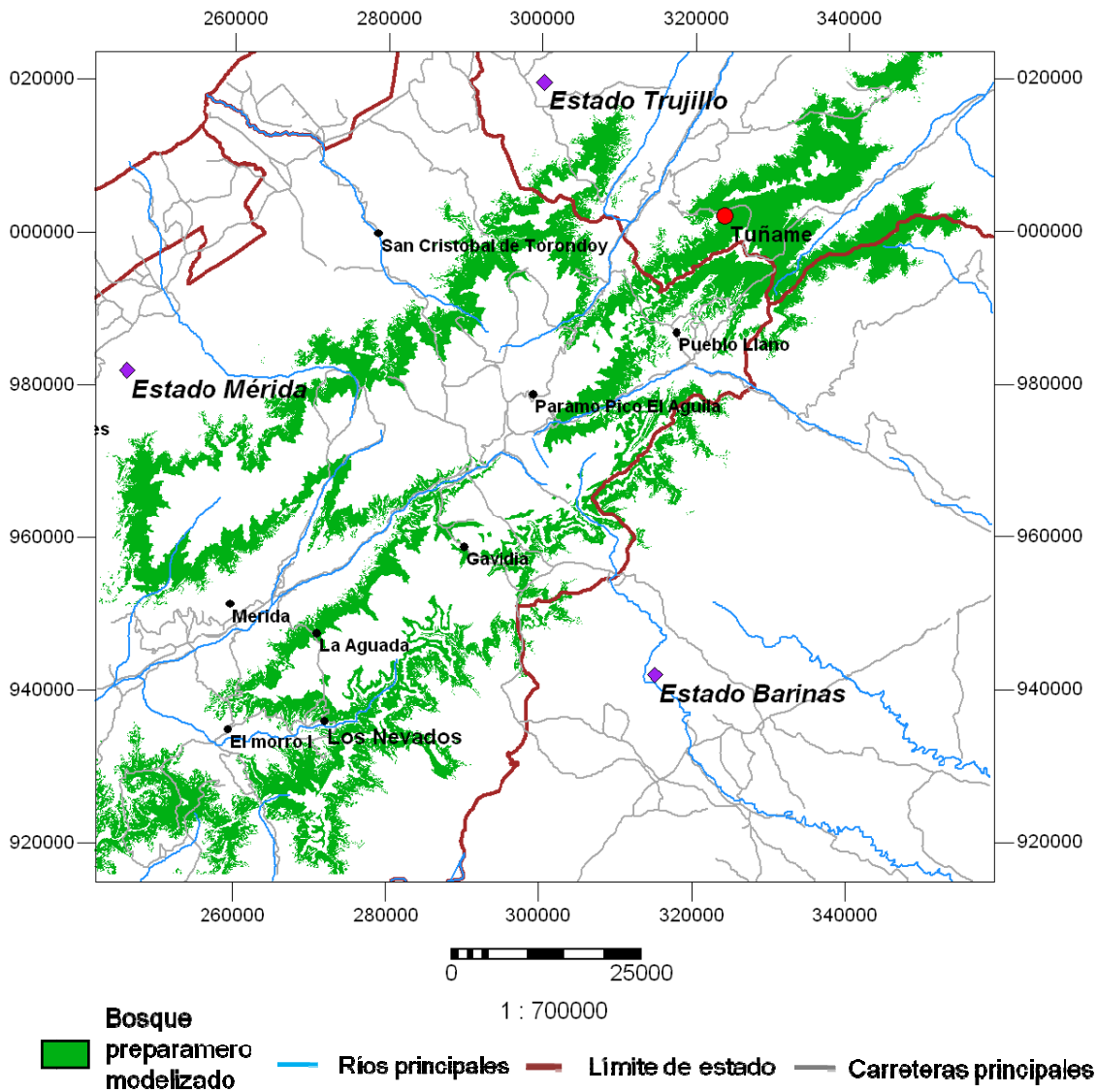


Figura 42. Modelo de distribución potencial del bosque preparamero en el núcleo central de Los Andes. Nótese que el modelo abarca 3 estados: Mérida, Trujillo y Barinas. El cuadrado rojo señala la ubicación de Tuñame con grandes extensiones de bosque preparamero en sus alrededores.

Tabla 12. Matriz de error para el modelo del bosque preparamero generado en este trabajo.

		Mapa de ecosistemas de Los Andes (MEA)		
		Bosque preparamero (Km ²)	Área donde no hay bosque preparamero (Km ²)	Suma total (km ²)
Modelo	Modelo (km ²)	444,16	1422,29	1866,44
	Área donde el modelo no señala bosque preparamero (km ²)	329,67	43608,52	43938,19
	Suma total (km ²)	773,83	45030,81	45804,64

Precisión general	precisión de la modelización	Fiabilidad
44052,67/45804,64 = 96%	444,15/773,83 = 57,4%	444,16/1866,44 = 24%

Interpretando la información más resaltante que se obtiene de la matriz de error se tiene que: el modelo generado abarca una área total de **1866,44** Km², de los cuales **444,16** Km² coinciden con el MEA, lo que resulta en un **24%** de fiabilidad. El bosque preparamero según MEA abarca un área de **773,83** Km² de los cuales **444,16** Km² se encuentran en el modelo realizado, otorgándole a la modelización una precisión de **57,4%**. Por último, el área total dentro de la cual se realizó la modelización es de **45804,64** Km², de los cuales **44052,67** Km² están correctamente modelizados, obteniéndose así una precisión general de **96%**.

6.3.4 Mapa de distribución potencial del bosque preparamero en escenarios de cambio climático.

Se presentan a continuación los mapas de distribución potencial del bosque preparamero en escenarios de cambio climático y la respectiva comparación de los escenarios generados con el modelo de distribución potencial.

-Escenario del UKMO.

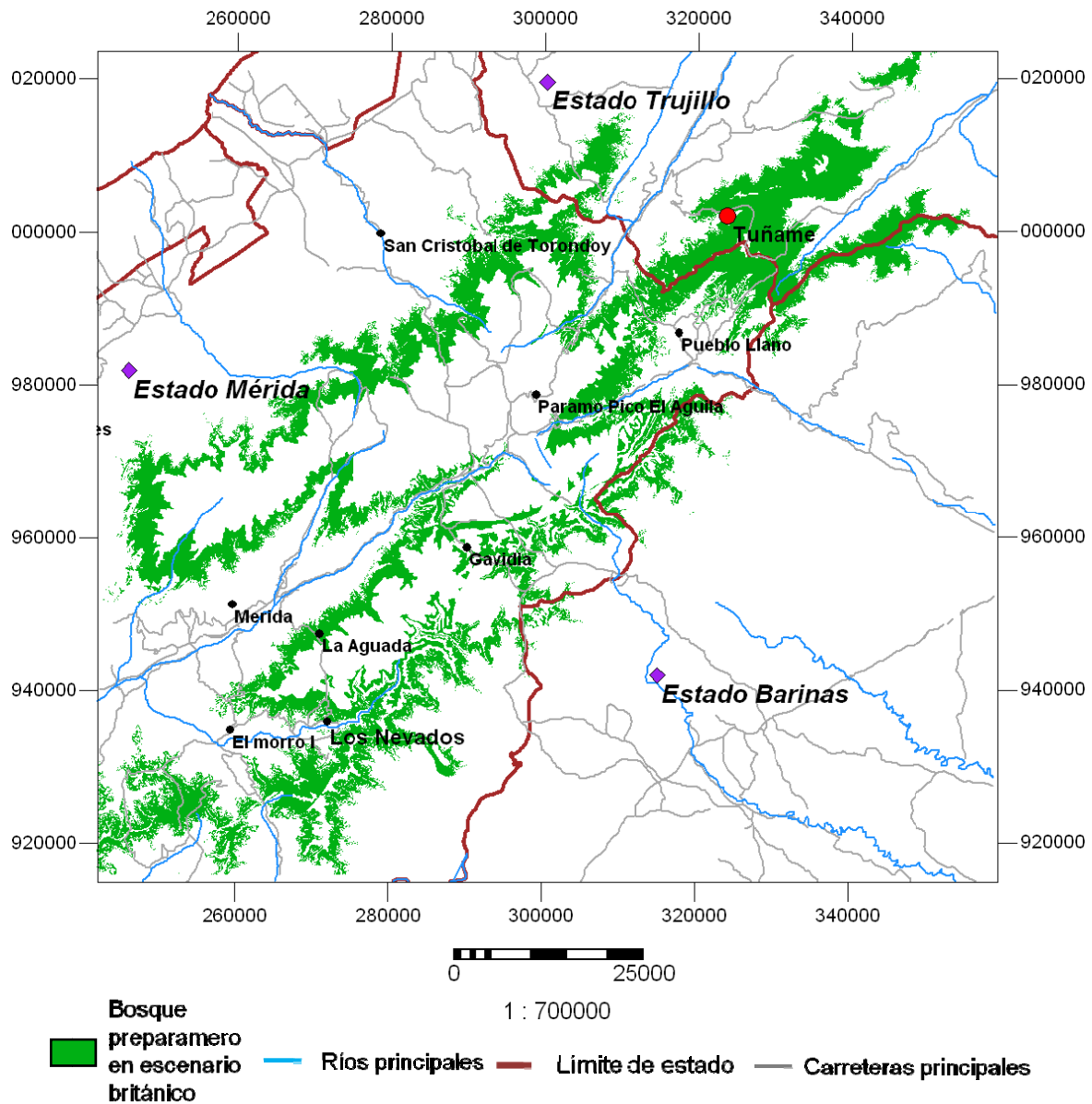


Figura 47. Escenario de cambio británico. El bosque preparamero a simple vista no parece ser muy afectado por el aumento de la temperatura que es de 0,7 °C sin variaciones en la precipitación.

-Escenario del CCCMA.

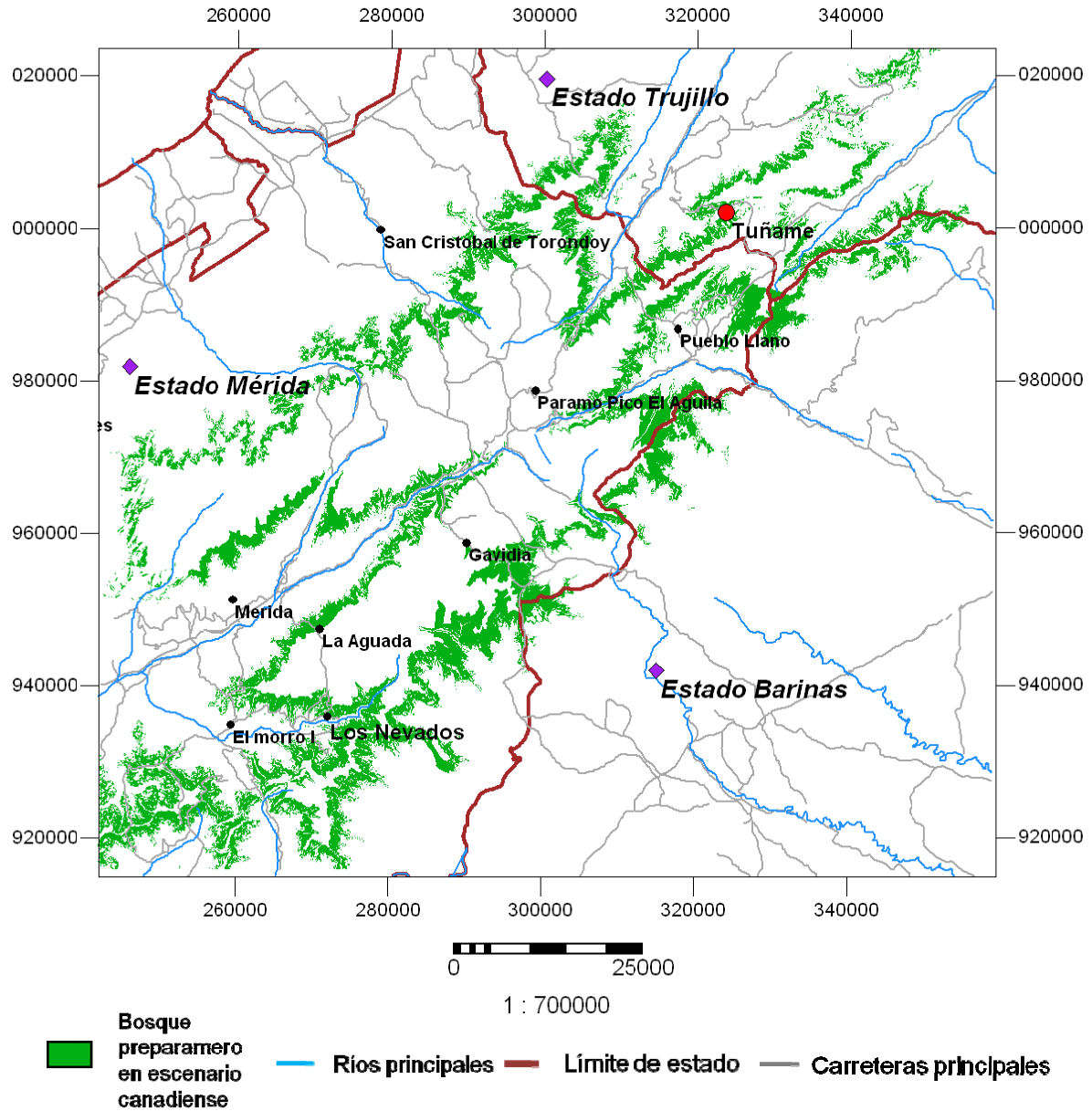


Figura 48. Escenario de cambio canadiense. Se observa mayor fragmentación del bosque paramero y mayor grosor de la franja de bosque hacia Los Llanos. El aumento de la temperatura es de 0,4 °C con disminución de las precipitaciones en 350 mm. anuales

Se observa que el modelo en escenario canadiense predice mayores impactos en la distribución del bosque preparamero, con una mayor fragmentación en el continuo del bosque alrededor de la cordillera. El escenario británico, en cambio, presenta menores impactos en la distribución del bosque. Llama la atención que a simple vista pareciera que el límite ubicado hacia Los Llanos presentara mayor grosor (figura 48) que las ubicaciones hacia el Sur del Lago.

6.3.5 Comparación de escenarios y modelo.

-Modelo de distribución potencial vs escenario del UKMO

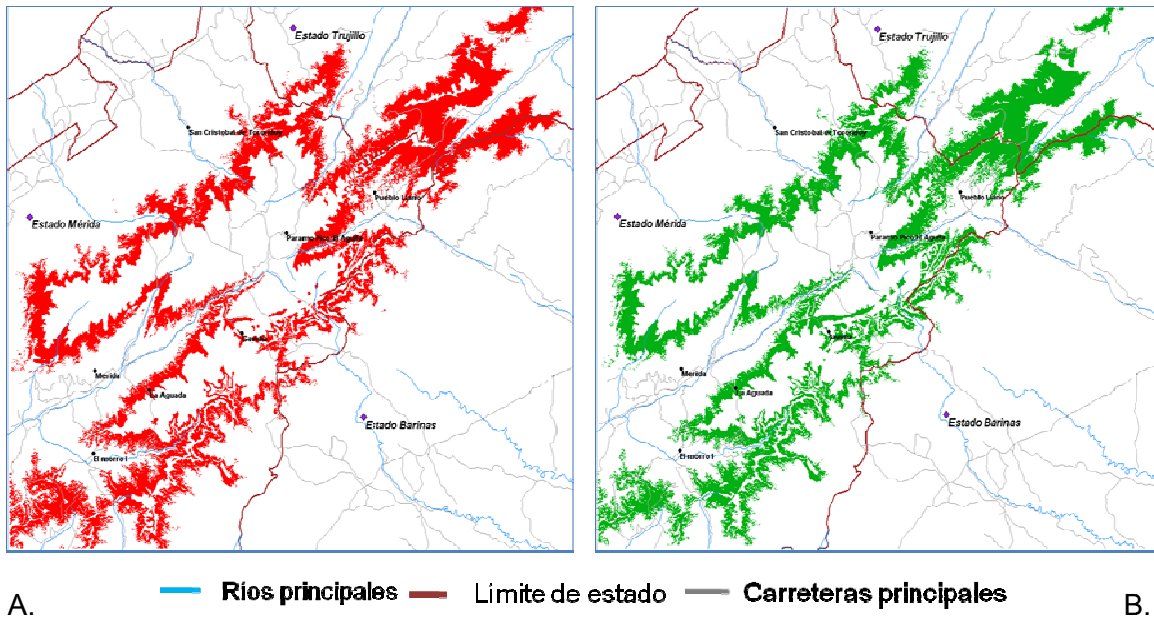


Figura 49. A) Modelo de distribución potencial del bosque preparamero. B) Escenario de cambio según UKMO con aumento de temperatura de 0,7 °C .

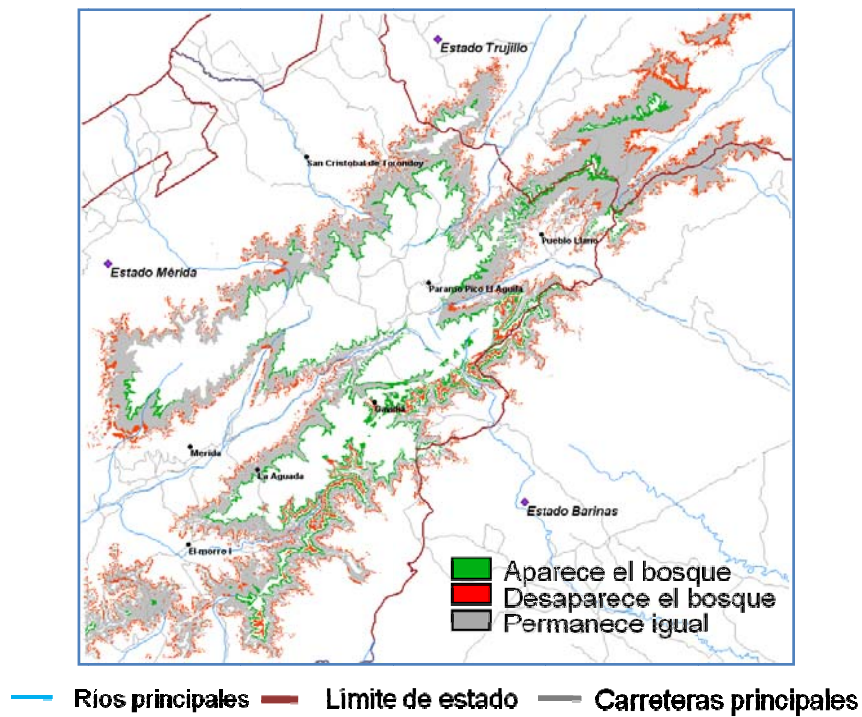
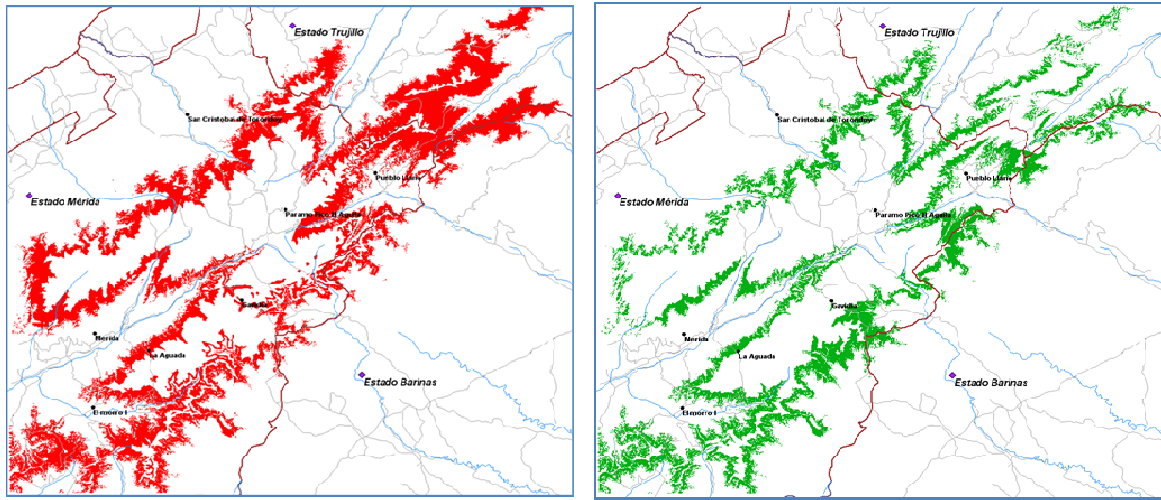


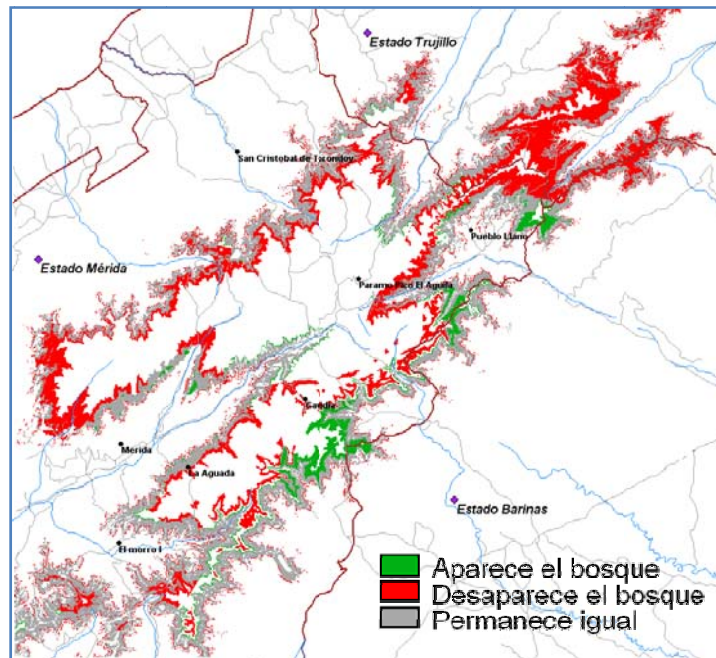
Figura 50. Mapa relación modelo/escenario. Nótese que el modelo predice desplazamiento hacia mayores elevaciones sin pérdida de bosque hacia el límite superior.

-Modelo de distribución potencial vs escenario del CCCMA



A. — Ríos principales — Limite de estado — Carreteras principales B.

Figura 51 A) Modelo de distribución potencial del bosque paramero. B) Escenario de cambio según CCCMA con aumento de temperatura de 0,4 °C y disminución de precipitaciones en 350 mm.



— Ríos principales — Limite de estado — Carreteras principales

Figura 52. Mapa relación modelo/escenario. Nótese que el modelo predice desplazamiento del bosque hacia mayores elevaciones con desaparición de áreas hacia el límite superior.

6.4 Discusión.

6.4.1 Modelo de distribución potencial del bosque preparamero

Evaluando el modelo generado del bosque preparamero (figura 42) con el mapa de ecosistemas de Los Andes de Chacón-Moreno *et al.* (2008) (figura 43), 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 preparamero se encuentre en el modelo es de 57,4%; mientras que la fiabilidad o probabilidad de que un pixel clasificado como bosque preparamero en el modelo sea efectivamente bosque preparamero es de 24%. Dicho de otra forma, el modelo “sobrestima” la distribución del bosque (figuras 44 y 45).

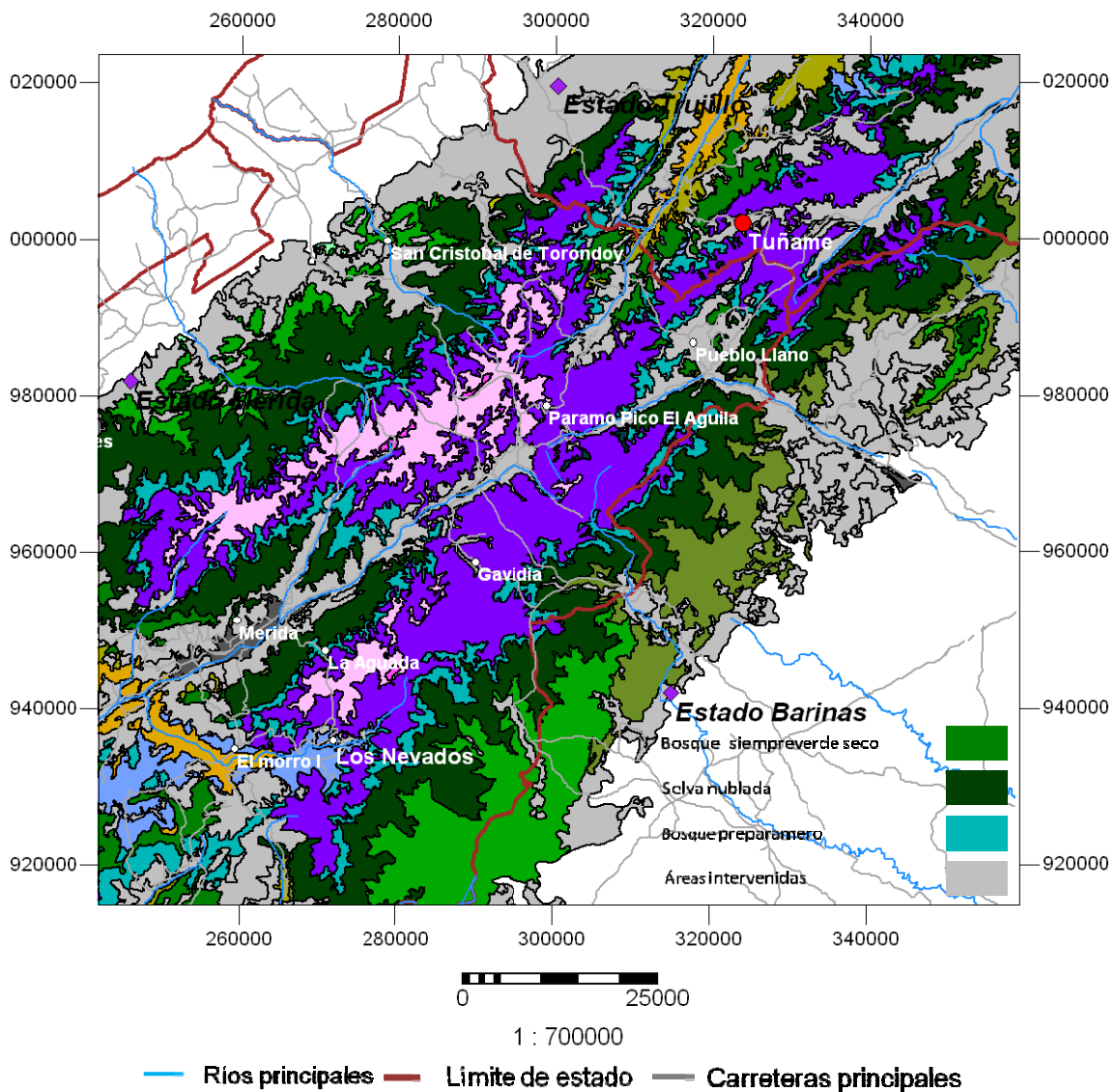


Figura 43. Mapa de ecosistemas de Los Andes. El cuadrado rojo representa a Tuñame con áreas intervenidas en sus inmediaciones representadas por el color gris.

El modelo fue generado a partir de variables climáticas y de la asociación de estas con la distribución del ecosistema de transición hacia el Páramo, 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 preparamero antes de haber sido objeto de tal intervención; estas áreas de intervención para el caso del MEA si eran detectadas durante la clasificación de la imagen en el proceso de generación del mapa y fueron excluidas y

consideradas como: “áreas intervenidas” en la leyenda del mapa (figura 43) ; de allí que se encuentre menor área de distribución del mencionado bosque. La discontinuidad en el borde observada en el MEA puede evidenciar este hecho, tal es el caso de las ubicaciones hacia el norte de Pueblo Llano, en el estado Trujillo, donde el modelo predice grandes áreas de bosque preparamero y el MEA reconoce grandes áreas intervenidas. (Figura 43).

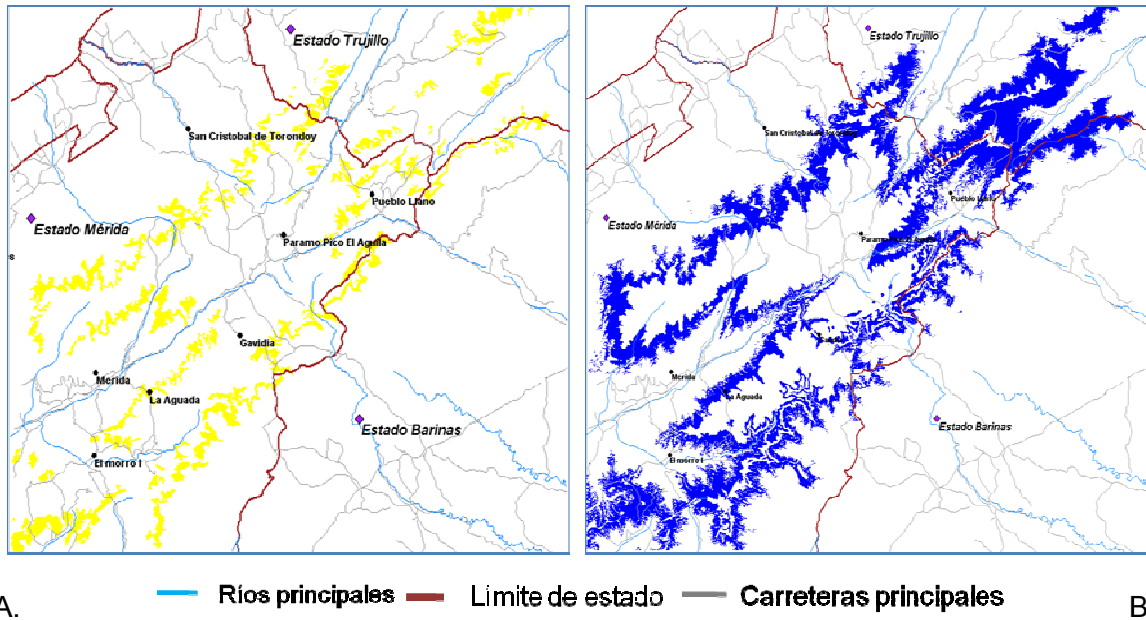


Figura 44. A) distribución del bosque preparamero según mapa de ecosistemas de Los Andes (MEA) (Chacón –Moreno et al. 2008). B) Modelo de distribución potencial del bosque preparamero generado en el presente trabajo.

Por otra parte, es necesario considerar los errores que pudieron tomar parte en la generación del modelo. Resaltan en primer lugar la generación de los mapas de distribución de las variables climáticas, donde los errores detectados durante la fase de depuración de datos apuntan a la poca fiabilidad que existe en torno a la información climática.

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 MEA y este mapa debe contar también con cierto margen de errores en su generación. Vale resaltar acá que este MEA no ha sido validado

en campo en su totalidad. Sin embargo 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 preparamero y una coincidencia con el MEA sumamente baja.

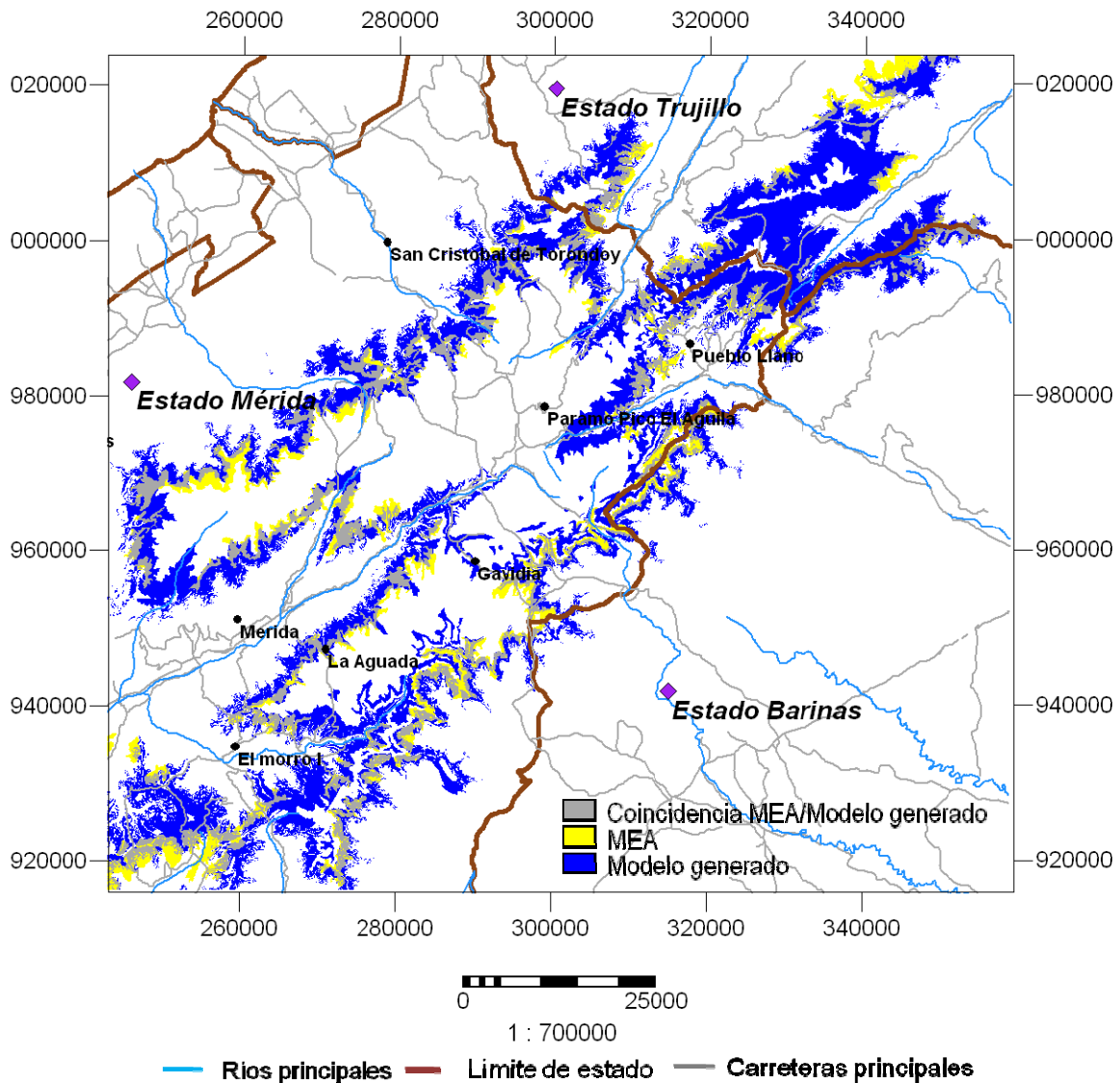


Figura 45. Relación modelo generado vs mapa de ecosistemas. El color azul representa la distribución del bosque predicha por el modelo y que no se observa en el mapa de ecosistemas. El color amarillo es la distribución del bosque según el mapa de ecosistemas y que no se observa en el modelo. El gris representa las regiones de bosque que coinciden para ambos trabajos.

Tomando como base este modelo potencial del bosque preparamero y el hecho de que fue generado con información climática que considera precipitaciones y temperaturas, se generaron modelos de distribución potencial del bosque en escenarios de cambio climático previstos por el IPCC de acuerdo a las proyecciones de la *United Kingdom Meteorological Office* (UKMO) y el *Canadian Center for Climatic and meteorological analysis* (CCCMA).

6.4.2 Mapas de distribución potencial del bosque preparamero 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 preparamero modelado en este trabajo (figura 49 y 50).

Con respecto al modelo canadiense, aun cuando representa un aumento menor de la temperatura, generaría la pérdida del 36% del bosque preparamero según el modelo generado, debido a la disminución de las precipitaciones (figura 51 y 52). Comparando ambos modelos, tanto el generado bajo condiciones actuales como el generado bajo escenarios de cambio canadiense (figura 53) 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.

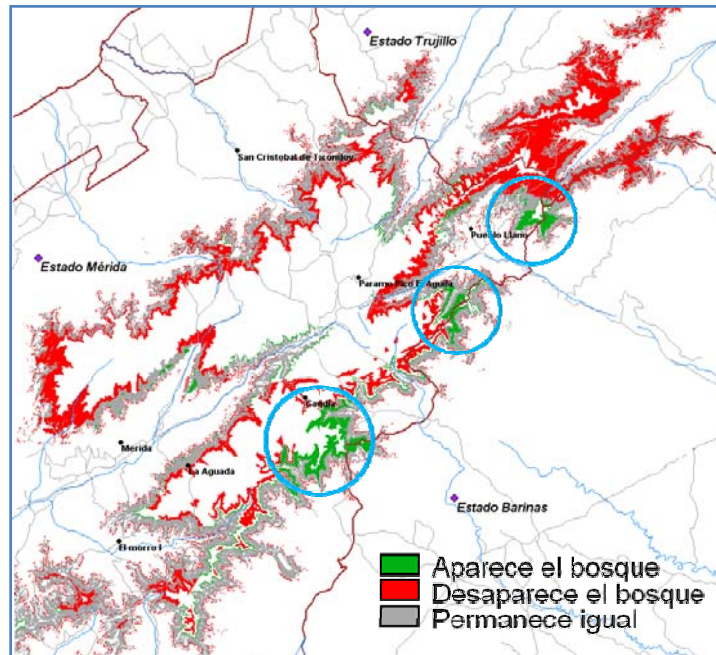


Figura 53. Relación de cambio modelo actual-modelo en escenario canadiense. Obsérvense las zonas en círculos donde hay aparición de bosque brindando la sensación de ser más gruesa la franja.

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 aparente fenómeno se asocia a los resultados ya obtenidos en los capítulos 4 y 5, donde la disponibilidad de agua y su capacidad para amortiguar los cambios de temperatura, específicamente evitando temperaturas muy bajas, actúa directamente sobre la distribución del bosque preparamero, 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 preparamero a mayores elevaciones, sino mas bien avance del paramo.

El escenario canadiense señala que límites superior e inferior del bosque paramero se verían afectados de distinta forma. En el límite superior se evidencia un retroceso del bosque paramero, lo que significaría un avance del paramo, mientras que en el límite inferior sin embargo, 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 un poco 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, desde el punto de vista en el que según este escenario 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, donde se pudiera encontrar que ante las variaciones atmosféricas que surgen como consecuencia del cambio climático, particularmente del aumento del CO₂, se ve 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 debido a que al considerar 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 tiene mayor peso en la distribución del bosque.

En el mismo orden de ideas, llama la atención que hacia las zonas consideradas como xéricas, Mucuchies y en particular las zonas aledañas hacia el Morro, presentan un patrón de distribución mucho mas “moteado” en relación a las 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 relativamente pequeñas áreas.

No se descarta que ambos fenómenos al estar prácticamente restringidos a la vertiente llanera con un patrón de distribución de precipitaciones pluviestacionales, estén asociados a este régimen hídrico, representado por los valores de lod2.

Capítulo 7. 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 preparamero, sirvió como excusa para la realización de este trabajo. Las proyecciones de aumento de la temperatura para el país, así como de disminución de precipitaciones para el núcleo central de Los Andes evaluadas por el MARNR, efectivamente tendrían impacto en la distribución del bosque preparamero y en el área total que este ocupa.

Es pertinente tener siempre en mente, que si bien en este trabajo se hizo uso de un modelo que responde a las relaciones causa-efecto y se fundamentó en la generalidad y la realidad del fenómeno de distribución del límite bosque-páramo, no considera la adaptabilidad del ecosistema ante variaciones en las variables consideradas en los escenarios de cambio ya que no toma en cuenta la respuesta de las especies que lo componen ante tales cambios.

Sin embargo, el modelo generado es buena aproximación de lo que pudiese ocurrir bajo cambios en las condiciones climáticas en las que ocurre el bosque preparamero, 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.

El funcionamiento de un ecosistema no está sujeto solamente a las interacciones abióticas, las interacciones bióticas son también importantes. Las relaciones poblacionales pueden ser determinantes al momento de evaluar la capacidad de desplazamiento del ecosistema, en este caso hacia mayores elevaciones, donde la dispersión y polinización de elementos del bosque preparamero por especies animales también pudiera verse afectada ante los cambios.

El solo hecho de que no se consideren los óptimos ecofisiológicos de los elementos que componen la diversidad del bosque, representa una limitante al tratar de evaluar su respuesta ante el cambio en las condiciones climáticas

considerando que no se conoce la capacidad de adaptación del bosque; respuesta esta última a la pregunta de cuán cierto son las variaciones en el límite arbóreo bajo escenarios de cambio climático.

La discontinuidad que se reconoce en la distribución real del bosque preparamero y observada en el MEA, repercute inmensamente en la existencia de corredores para el mantenimiento de la biodiversidad tanto animal como vegetal, propia no solamente del bosque preparamero sino de los ecosistemas que limitan con él.

La existencia de un continuo de bosque garantizaría el flujo permanente de elementos de poblaciones tanto animales como vegetales, sin que haya aislamiento de poblaciones que pudieran correr riesgo de extinción al ver menguado su número de individuos.

Este es el caso del modelo generado, donde el continuo de bosque alrededor de la cordillera andina 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?

Con respecto a los escenarios utilizados en el trabajo para generar los modelos de distribución del bosque preparamero ante cambios, se tiene que son escenarios que fueron generados a partir de simulaciones en el aumento de CO₂ a nivel global, no son escenarios “locales”.

Es cierto que estos escenarios trabajan dividiendo al globo en grillas de 5°x5° y que Venezuela está dividida en 8 grillas (MARNR 2005), lo que representa una resolución muy gruesa, pero antes de considerar este hecho como fuente de error es pertinente regresar a que los escenarios son proyecciones generadas considerando emisiones de CO₂ globales y que el tamaño de la grilla determina el área en la que se evalúa la interacción entre el clima *local* y esas emisiones *globales* de CO₂. Una mayor resolución de los escenarios debería considerar

entonces las distintas tasas de emisión de gases de efecto invernadero para el área de cada grilla.

Apartando los escenarios, el modelo que se ha generado en este trabajo de la distribución potencial del bosque preparamero, pudiera tener usos en el área de evaluación de impacto humano sobre el ecosistema, ¿cuánto del bosque preparamero 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?

Además del modelo de distribución del bosque, la información generada de la distribución de variables climáticas para el área de estudio representa fuente de información para futuros trabajos que requieran este tipo de información; por otra parte, la metodología desarrollada concerniente a la geoestadística, aporta información para la futura evaluación de datos climáticos.

Como recomendación final, no está de más señalar que para la realización de este tipo de trabajo, es necesario contar con procesadores con capacidad y memoria suficiente. La información total que fue necesario generar para realizar este trabajo rondo cerca de los 250 gigabytes (Gb).

Bibliografía

- Aber, J., Neilson, R., McNulty S., Lenihan, J., Bachelet, D., y Drapek, R., 2001. Forest processes and global environmental change: Predicting the effects of individual and multiple stressors. *BioScience* 51 (9).
- Ahrens, C., 2000. *Essentials of meteorology. An invitation to the atmosphere.* 3rd ed.
- Andressen, 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.
- Andressen , R.; Díaz de Pascual A. (2000). Influencia de la altitud y distancia al Lago de Maracaibo en la caracterización pluviométrica del estado Trujillo, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (Maracay).* 26: 107 - 124
- Aranoff, S., 1993. *Geographic Information Systems: A Management Perspective.* 3rd Ed. WDL Publications. Canada.
- Arundel, T., 2005. Using spatial models to establish climatic limiters of plant species' distributions. *Ecological Modelling* 182: 159 -181.
- 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.
- Bergant. K., Kajfež Bogataj, L. y Trdanc, S., 2006. Uncertainties in modelling of climate change impact in future: An example of onion thrips (*Thrips Tabaci* Lindeman) in Slovenia. *Ecological Modelling* 194: 244–255.
- 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.

- Cavieres, L. y Piper., F., 2004. Determinantes ecofisiológicos del límite altitudinal de los árboles. *Fisiología Ecológica en Plantas. Mecanismos y Respuestas a Estrés en los Ecosistemas*, 221 – 234 pp.
- Chacón-Moreno, E. 2007. Curso Introducción a la Interpretación y Análisis Digital de Imágenes Satelitales para Estudios de Vegetación. Material bibliográfico y de apoyo.
- Chacón-Moreno, E., Márquez, T., Rodríguez, M. y Ulloa, A. (En preparación) Mapa de Ecosistemas de Los Andes de Venezuela.
- China, J. 2002. Teledetección del bosque. En: Guariguata, M. y Catan, G. (Ed): *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Primera edición. Ediciones Libro Universitario Regional Costa Rica.
- Congalton, R. 1991. A Review of assessing the accuracy of clasifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment* 37:35-46.
- Comíns, J., Chuvieco, E., 1992. *Iberoamérica desde el Espacio*. Lunweg Ed. España.
- CONICIT, 1994. Censo de estaciones hidrometeorológicas en funcionamiento. Dirección de política y planificación del sector; Comisión nacional de meteorología e hidrología.
- Dale, V., 1997. The relationship between land-use change and climate change. *Ecological Applications* 7(3) 753-769 pp.
- 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.
- Grace. J., Berninger, F. y Nagy, L., 2002. Impacts of climate change on the tree line. *Review. Annals of Botany* 90:537-544 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 Zimmermann, N. 2000. *Ecological modelling* 135, 147-186.
- Guttman, N. 1989. Statistical descriptors of climate. *Bulletin of the American meteorological society*. Volume 70. Issue 6. 602-607 pp.
- Hengl, T., 2007. A practical guide to geoestatistical mapping of environmental variables. European commission, Joint Reseach Center, Institute for Environment and sustainability. Luxembourg Office for official publications of the European Communities.

- 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*. 25:1965-1978 pp.
- 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.
- Hoch, G. y Körner, Ch., 2003. The carbon charging of pines at the climatic treeline: a global comparison. *Oecologia* 135:10–21 pp.
- Hoch, G. y Körner, Ch., 2005. Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline. *Functional Ecology* 19, 941-951 pp.
- 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.
- ILWIS 3.0 Academic. User's Guide 2001. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) Enschede, The Netherlands.
- 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.
- Jeppesen Theoretical Knowledge Manual. 2001. 050 Meteorology. 1st ed. Oxford Aviation training.
- 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.
- Jobbágy, E. y Jackson, R., 2000. Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology & Biogeography* (2000) 9,253-268 pp.
- Josse C., Cuesta F., Navarro G., Barrena V., Cabrera E., Chacón-Moreno E., Ferreira W., Peralvo M., Saito J. y Tovar A. 2008. Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centrales. Bolivia, Colombia, Ecuador, Peru y Venezuela. CAN, Programa Regional ECOBONA, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, LTA-UNALM, IAvH, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima.
- Jump, A. y Peñuelas, J., 2005. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters*. 8: 1010-1020 pp.

- Kessler, M. 2006. Bosques de *Polylepis*. En *Botánica Económica de Los Andes Centrales*. (Ed) Moraes, M. Ollgaard, B. Kvist, L; Borchsenius, F. Balslev, H. Universidad Mayor de San Andres, La Paz- Bolivia.
- 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., 1998. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115:445 – 459.
- 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.; Vazquez-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.
- Mahaney, W., Kalm, V. y Bezada, M., 1997. Estratigrafía del cuaternario tardío de un ambiente periglacial en el área de Mucubají, Mucuchaché, El Pedregal. Andes centrales venezolanos. *Memorias del I Congreso Latinoamericano de Sedimentología, Sociedad Venezolana de Geología. Noviembre 1997, Tomo I – 417-424 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.
- Mayr, S., Schwienbacher, F. y Bauer, H. 2003. Winter at the Alpine Timberline. Why Does Embolism Occur in Norway Spruce But Not in Stone Pine?. *Plant Physiology*, Vol. 131, 780–792 pp.
- 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.
- Ni, J., Harrison, S., Colin I., Kutzbach, J. y Stich, S., 2006. Impact of climate variability on present Holocene vegetation: A model-based study. *Ecological Modelling* 191: 469-486 pp.

- Pfeffer, K., Pebesma, E., y Burrough, P., 2003. Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape Ecology* 18: 759–776 pp.
- PNUMA, 2007. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Unidad de comunicaciones e información pública. Resumen de prensa, viernes 2 de febrero 2007. México.
- Rada, F; Azocar, A; Briceño, B; Gonzalez, J; Garcia-Nuñez, C. Carbon and wáter balance in *Polylepis seríceea*, a tropical treeline species. *Trees* (1996) 10: 218-222 pp.
- Rada, F; Garcia-Nuñez, C; Boero, C; Gallardo, M; Hilal, M; Gonzalez, J; Prado, F; Liberman-Cruz, M; Azocar, A. 2001. Low-temperature resistance in *Polylepis tarapacana*, a tree growing at the highest altitudes in the world. *Plant Cell and Environment* 24, 377-381 pp.
- Rial, J.A., 2004. Abrupt climate change: chaos and order at orbital and millennial scales. *Global and Planetary Change* 41 pp. 95–109 pp.
- Rivas-Martínez, S. 2004. http://www.ucm.es/info/cif/book/bioc/global_bioclimatics_1.htm
- Ruíz, R. 2005. Sistema agroecológico Piaroa en la Reserva Forestal Sopapo. Un enfoque ecológico del paisaje. Trabajo Especial de Grado. Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. Mérida – Venezuela.
- Rull, V., Abbott, M., Polissar, P., Wolfe, A., Bezada, M. y Bradley, R., 2005. 15,000-yr pollen record of vegetation change in the high altitude tropical Andes at Laguna Verde Alta, Venezuela. *Quaternary Research* 64: 308 – 317 pp.
- Rull, V; Vegas-Vilarrubia, T; Nogue, S; Montoya, E; Cañelas, N; 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.
- Sabins, M. S. 1987. *Remote Sensing. Principles and Interpretation*. W.H. Freeman and Company, New York.
- 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 Merida. 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.; 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.
- Segnini, S. 2004. Fundamentos de Bioestadística. Universidad de Los Andes Facultad de Ciencias Departamento de Biología.
- Sodja, I. 2001. Estudio Florístico del Cerro Pozo Negro, Paramo de San José (Mérida-Venezuela). Trabajo especial de grado. Centro Jardín Botánico. Departamento de Biología. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Stansell, N; Abbot, M; Polissar,P; Wolfe, A; Bezada, M. Rull, V. 2005. Late quaternary deglacial history of the Merida Andes, Venezuela. *Journal of Quaternary Science* 20(7-8) 801-812 pp.
- Stansell, N; Polissar,P; Abbot, M. 2007. Last maximum equilibrium-line altitude and paleo-temperature reconstructions for the Cordillera de Merida, Venezuelan Andes. *Quaternary Research* 67 115-127 pp.
- Smith, W., Germino, M., Hancock, T. y Johnson, D. 2003. Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines. *Tree Physiology* 23, 1101-1112 pp.
- Sokal, R., y Rohlf, J. 2000. *Biometry. The principles and practice of statistics in biological research.* 3º ed. W. H. Freeman and company, New York.
- Tranquillini, W. 1979. *Physiological Ecology of the Alpine Timberline.* Springer-Verlag.
- U.S Environmental Protection Agency. 2008. <http://www.epa.gov/climatechange/science/futuretc.html>. 29 de febrero 2008
- Van Der Hammen, T., 1974. The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography*, 1, 3-26 pp.
- Vivas, L. 1992. *Los Andes Venezolanos.* Academia Nacional de la Historia. Caracas. Venezuela.
- Weingarten, B; Yuretich, R; Bradley, R; 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.
- Yáñez, P. 1998. Caracterización florística en un sector de cambio páramo-selva nublada en el parque nacional Sierra Nevada. *Revista Forestal Venezolana.* 42(1):51-62.

Anexos

Anexo 1.

Registro de estaciones meteorológicas considerado en el estudio.

Anexo 2.

Aspectos generales para la realización de kriging de datos de precipitación.

Una vez generado el mapa de puntos con la ubicación y registro respectivo de las estaciones meteorológicas, se realiza un análisis de correlación espacial entre las distancias entre puntos y el registro de precipitación de cada uno; utilizando para las distancias la mayor distancia medida entre puntos sobre el mapa de puntos ya generado. De este proceso se obtiene una tabla de valores calculados por el programa donde se aprecia el número de puntos para cada distanciamiento entre ellos procurando no obtener columnas con menos de 30 pares de puntos en la columna número de puntos ya que de ser así el procesamiento de los datos no sería confiable. (Figura 1)

	Distance	NrPairs	I	c	AvgLag	SemiVar
1	0.0	22	0.564	0.07	1059.8	13758.98
2	5000.0	90	0.562	0.35	5227.5	70913.50
3	10000.0	111	0.177	0.77	10394.3	155016.47
4	15000.0	122	0.025	0.86	14967.5	173046.36
5	20000.0	120	-0.140	1.03	20078.2	208092.71
6	25000.0	133	-0.217	1.15	25016.4	232123.94
7	30000.0	157	0.004	0.91	29908.7	184089.26
8	35000.0	141	-0.305	1.46	34850.3	293487.62
9	40000.0	178	-0.162	1.22	39945.4	244959.14
10	45000.0	141	-0.089	1.25	44847.1	251350.94
11	50000.0	154	-0.026	1.15	49947.6	231730.88
12	55000.0	131	0.124	0.96	55027.4	194178.43
13	60000.0	126	0.164	0.95	60103.6	190277.04
14	65000.0	116	0.109	0.92	65042.2	185670.12
15	70000.0	128	0.222	0.74	69760.0	148879.50
16	75000.0	98	-0.070	1.20	75061.1	242445.59
17	80000.0	81	-0.351	1.30	80056.0	262344.89
18	85000.0	109	-0.097	1.11	84854.2	222553.39
19	90000.0	88	-0.078	1.17	89969.2	235543.18
20	95000.0	60	-0.214	1.44	94882.3	290829.96
21	100000.0	56	-0.133	0.96	100186.4	193129.63
22	105000.0	86	0.295	0.66	105269.6	132579.72
23	110000.0	82	-0.081	1.05	110016.9	210937.09
24	115000.0	85	0.002	0.93	114786.6	187267.92
25	120000.0	69	0.151	0.56	119598.1	112868.73
26	125000.0	52	0.042	0.73	124856.1	147916.65
27	130000.0	41	-0.043	0.67	130699.3	134922.99
28	135000.0	61	-0.006	0.41	135256.0	82558.62
29	140000.0	45	-0.130	1.10	140192.2	222016.81
30	145000.0	22	-0.188	1.33	145027.1	268358.93
31	150000.0	16	-0.518	1.63	149683.3	327967.97
32	155000.0	5	-1.336	2.99	154551.9	601657.60
33	160000.0	0	?	?	?	?
34	165000.0	0	?	?	?	?
35	170000.0	0	?	?	?	?
36	175000.0	0	?	?	?	?
Min	0.0	0	-1.336	0.07	1059.8	13758.98
Max	175000.0	178	0.564	2.99	154551.9	601657.60
Avg	87500.0	81	-0.054	1.03	77535.1	207921.08
StD	52678.3	51	0.326	0.49	46818.1	98794.88
Sum	3150000.0	2926	-1.744	33.06	2481122.3	6653474.55

Maximum of values in column: c: Geary's c, a statistic for spatial autocorrelation

Figura 1. Vista de la tabla generada a partir del mapa de puntos. Las columnas muestran de izquierda a derecha: la distancia acumulada entre punto y punto, el número de puntos ubicados en esa distancia, la autocorrelación, autovarianza, distancia promedio y valores del semivariograma.

Una vez obtenida la tabla se genera el gráfico Distancia x Semivar; este es el semivariograma de los datos (Figura 2) y es el que aporta verdaderamente la información necesaria para generar el mapa raster de interpolación de la distribución de las precipitaciones.

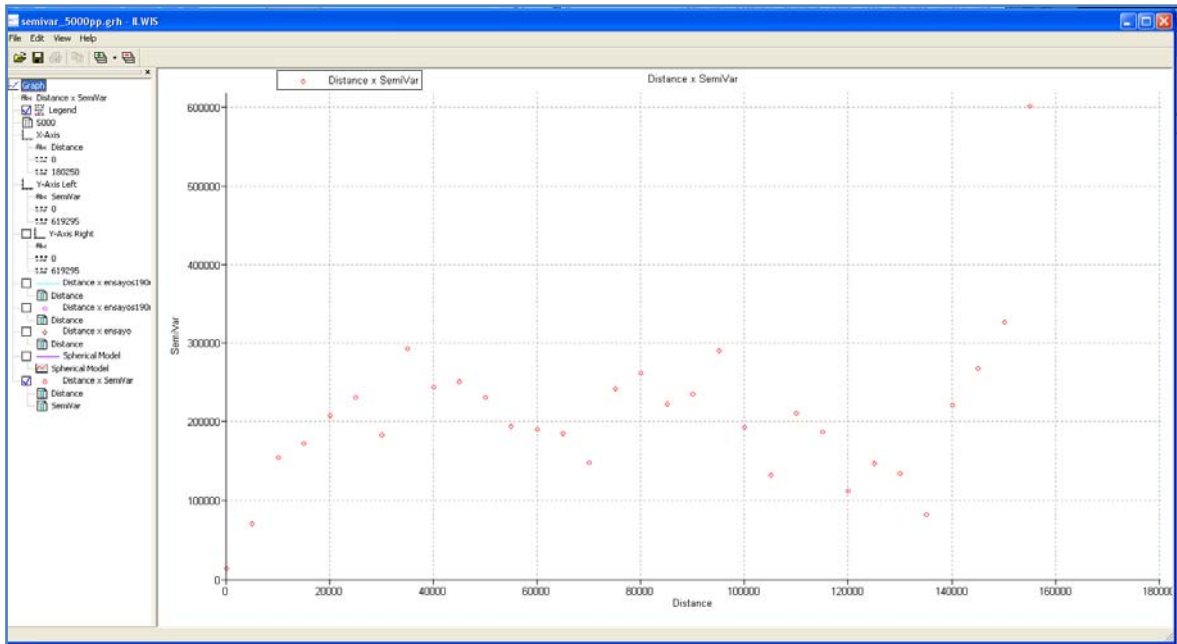


Figura 2. Semivariograma para los pares de puntos de registros de precipitación. Construido con la información de la tabla mostrada en la figura 6.

Al observar el semivariograma se obtienen los valores según sus nombres en inglés de nugget, sill y range, los cuales son los parámetros necesarios para la obtención de una interpolación lo más ajustada posible al comportamiento real de la variable. Estos parámetros en el semivariograma son indispensables para el kriging. El comportamiento de los puntos en la gráfica también evidencia una tendencia a la cual se le puede ajustar una función ofrecida por el mismo paquete o software con el que se realice el análisis de kriging; en este caso la función que mejor se ajusta al comportamiento de los puntos es la función que describe el modelo esférico.

A continuación y para el mejor entendimiento de cuán necesarios son estos valores, una breve explicación de su significado.

-Nugget

Es un valor pequeño y representa o implica que existe variabilidad para puntos separados por cero metros. Es el valor de la semivarianza al extrapolar el menor punto registrado en la distancia. El nugget es el que le da la curvatura al modelo y lo ajusta a los puntos que están correlacionados.

-Sill

Es el valor de la Semivarianza que se corresponde con el valor en la distancia a partir del cual los datos no están correlacionados.

-Range

Es el valor en el eje de la abscisa que se corresponde con el Sill y donde a partir del cual los datos son erráticos u oscilan alrededor de una constante. Se pueden observar estos parámetros en el semivariograma de los datos de precipitación en la figura 8.

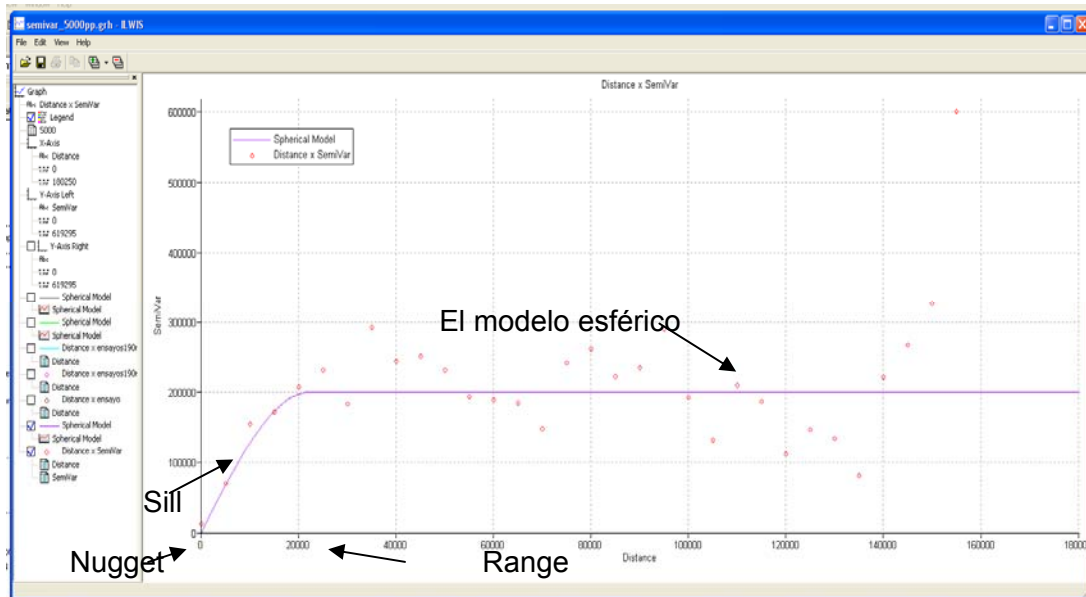


Figura 8. Se aprecian los parámetros necesarios para la realización del kriging y la línea de función que mejor se ajusta a los datos. El eje X muestra las distancias entre puntos y el Y la semivarianza.

Es importante tomar en cuenta que en la práctica es frecuente que más del 95% del peso de la variable en términos de la correlación sea explicado por los 30-50 puntos más cercanos y que sólo si el variograma presenta un efecto nugget muy marcado los puntos más distantes recibirían más importancia pero las predicciones serían pobres (Hengel 2007); en este caso el efecto nugget es muy bajo.

Una vez determinados estos parámetros, se procedió a generar el mapa raster de precipitación

Anexo 3.

Matriz presencia-ausencia ausencia de los limites inferior y superior del bosque preparamero.

TEG MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA LÍNEA DE CONTACTO BOSQUE-PÁRAMO EN LOS ANDES VENEZOLANOS- PATRICIA SUÁREZ DEL MORAL

Anexo 1

Registro de estaciones meteorológicas considerado en el estudio

Estaciones con registro de precipitación

Nº Estación	Estacion	Coordenadas	Período de Tiempo - Registro considerado	Organismo Responsable	Altitud	Situación actual	Precipitación Promedio del Período Considerado
1	Bailadores I	8°15'10.00"N, 71°49'37.00"W	1971 y 1974 a 1982	MARNR	1736	Eliminada Enero 1983	668
2	Campamento Mitisus	8°54'00.00"N, 70°38'00.00"W	1949 a 1952	MARNR	1500	Eliminada Enero 1953	1754
3	Canaguá	8°08'08.00"N, 71°26'25.00"W	1969 y 1971 a 1997	MARNR	1560	En uso	1422
4	Capazones	8°49'15.00"N, 71°26'41.00"W	1975 a 1987 y 1991 a 1993	MARNR	115	En uso	1703
5	Capurí	8°08'00.00"N, 71°36'13.00"W	1987 a 1993 y 1995 a 1997	MARNR	1620	En uso	996
6	Chacantá	8°10'32.00"N, 71°26'00.00"W	1970; 1972 a 1973; 1976 a 1983 y 1986 a 1995	MARNR	1846	En uso	1172
7	Chachopo I	8°56'28.00"N, 70°46'08.00"W	1942 a 1943; 1955 a 1957 y 1961 a 1971	MARNR	2505	Eliminada Enero 1973	881
8	Chiguará	8°29'32.00"N, 71°32'07.00"W	1951 a 1969	MARNR	1000	En uso	629
9	Ejido I	8°32'58.00"N, 71°14'10.00"W	1951 a 1964	MARNR	1200	Eliminada Enero 1966	880
10	El Mesón	8°24'45.00"N, 71°35'40.00"W	1969; 1972 a 1980; 1982; 1986 y 1988 a 1993	MARNR	1264	En uso	1398
11	El Molino	8°12'15.00"N, 71°33'00.00"W	1970 a 1984; 1986 a 1987; 1990; 1992 a 1995	MARNR	1877	En uso	882
12	El Morro de Motus	8°55'20.00"N, 70°40'35.00"W	1971 a 1983	MARNR	2450	Eliminada Enero 1984	1308
13	El morro I	8°27'05.00"N, 71°11'04.00"W	1964; 1967 a 1974; 1976 a 1980; 1982 a 1983 y 1987 a 1995	MARNR	1830	En uso	467
14	El Perol	8°56'06.00"N, 70°40'45.00"W	1972 a 1973; 1978 a 1984; 1989 a 1992 y 1995	MARNR	2460	En uso	1540
15	El vigía	8°36'27.00"N, 71°37'47.00"W	1953 a 1962; 1964 a 1983 y 1986 a 1995	MARNR	130	En uso	1838
16	Estanquez I	8°27'00.00"N, 71°31'00.00"W	1971 a 1980	ULA	462	Eliminada Junio 1981	532
17	Estanquez II	8°27'32.00"N, 71°31'56.00"W	1943 a 1945 y 1951 a 1969	MARNR	452	Eliminada Enero 1970	531
18	Gavidia	8°40'06.00"N, 70°54'27.00"W	1991 y 2000 al 2003	ICAE	3450	En uso	1302
19	Guaraque-La Quinta	8°08'55.00"N, 71°42'38.00"W	1967 a 1969; 1973 a 1980; 1982 a 1987; 1990 a 1993 y 1997	MARNR	1710	En uso	960
20	Guayabones	8°45'21.00"N, 71°35'52.00"W	1974 a 1987; 1993 y 1995	MARNR	70	En uso	1929
21	Hacienda El Carmen	8°41'10.00"N, 71°05'45.00"W	1971 a 1983	MARNR	2250	Eliminada Enero 1984	1966
22	La Azulita I	8°43'30.00"N, 71°26'31.00"W	1969; 1972 a 1974; 1978 1985; 1987; 1990 a 1992 y 1995	MARNR	1000	En uso	1445
23	La Azulita-Escuela Granja	8°42'20.00"N, 71°27'17.00"W	1981 a 1983	MARNR	1280	Eliminada Enero 1985	1416
24	La Carbonera	8°38'00.00"N, 71°24'00.00"W	1970 a 1976	ULA	2240	En uso	1399
25	La Cuchilla	8°38'00.00"N, 71°21'10.00"W	1967; 1969 a 1985; 1990 a 1993 y 1997	MARNR	2280	En uso	1400
26	La Culata	8°57'12.00"N, 70°38'38.00"W	1969; 1973; 1977 a 1983; 1986; 1988 y 1990 a 1993	MARNR	2600	En uso	1376
27	La Mesa de Aracay	8°56'03.00"N, 70°36'46.00"W	1969 a 1970; 1974 a 1981; 1983; 1988; 1990 a 1992 y 1995	MARNR	1980	En uso	1574
28	La Mitisus	8°53'15.00"N, 70°38'30.00"W	1957 a 1965; 1968; 1970 a 1982; 1984 y 1990 a 1993	MARNR	1666	En uso	1677
29	La Palmita	8°33'03.00"N, 71°36'02.00"W	1954; 1956 a 1964; 1966 a 1974; 1977 a 1983; 1985; 1991; 1992; 1995 y 2000	MARNR	600	En uso	1280
30	La Playa	8°18'29.00"N, 71°46'48.00"W	1951 a 1969	MARNR	1500	Eliminada Enero 1971	716
31	La Punta I	8°33'49.00"N, 71°11'20.00"W	1977 a 1980; 1982 a 1983; 1985; 1988; 1990 a 1993 y 1995 a 1996	MARNR	1300	En uso	1202
32	La Punta-Concepcion	8°34'16.00"N, 71°10'48.00"W	1954 a 1957; 1959 y 1961 a 1969	MARNR	1323	Eliminada Enero 1970	1216
33	Lagunillas	8°30'25.00"N, 71°23'14.00"W	1950; 1953 a 1955 y 1957 a 1967	MARNR	1079	Eliminada Enero 1968	444
34	Las Mesas	8°52'30.00"N, 70°35'35.00"W	1973 a 1978; 1980 y 1989 a 1993	MARNR	1366	En uso	2440
35	Las Piedras	8°53'35.00"N, 70°38'21.00"W	1969 a 1983	MARNR	1657	Eliminada Enero 1984	1592
36	Las Tapias	8°13'41.00"N, 71°50'41.00"W	1970 a 1980; 1982 a 1983; 1986 y 1990 a 1993	MARNR	1920	En uso	719
37	Los plantios	8°49'11.00"N, 70°47'05.00"W	1970 a 1970 a 1983; 1986 a 1988; 1990 a 1991; 1993 y 1995	MARNR	3878	En uso	1027
38	Mérida I	8°41'00.00"N, 71°09'00.00"W	1951 a 1953; 1955 a 1970 y 1973	MARNR	1707	Eliminada Enero 1974	1455
39	Mérida II	8°36'00.00"N, 71°09'00.00"W	1968 a 1970	MARNR	1870	Eliminada Enero 1971	1995
40	Mérida-aeropuerto	8°36'00.00"N, 71°11'00.00"W	1921 a 1985 y 1987 a 2006	SMFAV	1479	En uso	1738
41	Mérida-Granja	8°35'00.00"N, 71°09'30.00"W	1941 y 1943 a 1946	MARNR	1600	En uso	1716
42	Mesa Bolivar	8°28'42.00"N, 71°35'05.00"W	1951; 1953; 1955 a 1968; 1970 a 1974; 1976 a 1978; 1980; 1982 a 1985; 1989; 1991 a 1993 y 1995	MARNR	1000	En uso	1047
43	Mesa de Ejido	8°33'00.00"N, 71°17'06.00"W	1950 a 1959; 1961; 1963 a 1973; 1975 a 1983; 1988; 1991 a 1993 y 1997	MARNR	1520	En uso	858
44	Mesa Julia	8°55'47.00"N, 71°13'56.00"W	1975 a 1995	MARNR	950	En uso	1987
45	Mucubají	8°48'10.00"N, 70°49'22.00"W	1970 a 1983; 1986 a 1988; 1990 a 1993 y 1995	MARNR	3560	En uso	916
46	Mucuchachí	8°09'04.00"N, 71°20'11.00"W	1971 a 1975; 1977 a 1978; 1980 a 1983 y 1986 a 1995	MARNR	1020	En uso	1344
47	Mucuchies I	8°45'04.00"N, 70°55'03.00"W	1953 a 1955; 1957 a 1961; 1963 a 1975 y 1977 a 1983	MARNR	2950	Eliminada Enero 1984	587
48	Mucuchies II	8°46'00.00"N, 70°54'00.00"W	1941; 1943 a 1946; 1949 a 1955; 1958; 1962; a 1965 y 1972 a 1984	MARNR	3100	En uso	690
49	Mucujepe	8°38'53.00"N, 71°34'08.00"W	1981 a 1985; 1988; 1991 y 2000	MARNR	120	En uso	1897
50	Mucurubá I	8°43'00.00"N, 71°00'00.00"W	1949; 1952 a 1953 y 1967 a 1971	MARNR	2295	Eliminada Octubre 1972	852
51	Mucurubá II	8°42'22.00"N, 70°59'33.00"W	1950 a 1953; 1955 a 1957; 1959 a 1964 y 1966 a 1983	MARNR	2320	Eliminada Enero 1984	829
52	Paramo de Mucuchies	8°51'05.00"N, 70°50'19.00"W	1943; 1947 a 1951; 1958; 1960; 1962 y 1973 a 1976	MARNR	3685	En uso	813
53	Paramo El molino	8°18'31.00"N, 71°34'24.00"W	1962 a 1983	MARNR	2750	Eliminada Enero 1984	1176
54	Paramo El Quemado	8°14'45.00"N, 71°44'01.00"W	1968; 1972 a 1980; 1986 a 1987 y 1990 a 1993	MARNR	2212	En uso	1488
55	Paramo Pico El Aguila	8°51'00.00"N, 70°49'37.00"W	1956; 1958 a 1961; 1964; 1970; 1973 a 1980; 1982; 1985 a 1988; 1990 a 1993 y 1995	MARNR	4126	En uso	804
56	Pueblo Llano	8°55'25.00"N, 70°39'30.00"W	1971 a 1983	MARNR	2230	Eliminada Enero 1984	1209
57	San Cristobal de Torondoy I	9°05'30.00"N, 71°02'00.00"W	1980 a 1983; 1987 y 2000	MARNR	420	En uso	2403
58	San Cristobal de Torondoy II	9°07'00.00"N, 70°55'00.00"W	1934 a 1945	MARNR	1107	Eliminada Mayo 1946	1120

59	San Cristobal de Torondoy-alcaldia	9°02'23.00"N, 71°00'46.00"W	1957 y 1960 a 1978	MARNR	1107	Eliminada Enero 1980	1034
60	San Cristobal de Torondoy-Shussler	9°01'00.00"N, 71°01'00.00"W	1934 a 1945	MARNR	1107	En uso	1120
61	San Juan Lagunillas	8°30'40.00"N, 71°21'14.00"W	1971 a 1983; 1986 a 1988 y 1990 a 1993	MARNR	1050	En uso	524
62	San Pedro Chiguara	8°30'25.00"N, 71°34'30.00"W	1970 a 1980; 1983; 1985 a 1986 y 1988 a 1993	MARNR	1078	En uso	833
63	San Rafael de Mucuchies	8°46'16.00"N, 70°52'24.00"W	1951 a 1954 y 1956 a 1970	MARNR	3140	Eliminada Enero 1971	608
64	Santa Cruz de Mora	8°24'00.00"N, 71°38'28.00"W	1954 a 1971	MARNR	560	Eliminada Enero 1973	1058
65	Santo Domingo	8°52'27.00"N, 70°40'27.00"W	1965 a 1966; 1969; 1971a 1983; 1988 a 1993 y 1995	MARNR	2155	En uso	1277
66	Santo Domingo-prefectura	8°51'45.00"N, 70°41'41.00"W	1953 a 1956 y 1963 a 1970	MARNR	2150	Eliminada Enero 1971	1271
67	Tabay	8°38'07.00"N, 71°04'09.00"W	1950 a 1953; 1955 a 1957; 1959 a 1970; 1972 a 1973; 1975 a 1980; 1982; 1986; 1988 a 1990 y 1992 a 1994	MARNR	1720	En uso	1566
68	Timotes I	8°59'05.00"N, 70°44'20.00"W	1942 a 1948; 1955; 1957 a 1961 y 1963 a 1968	MARNR	2016	Eliminada Enero 1970	872
69	Timotes II	8°59'00.00"N, 70°44'00.00"W	1942 a 1946	MARNR	2025	Eliminada Diciembre 1946	1101
70	Timotes III	8°59'00.00"N, 70°44'00.00"W	1953 a 1973	MARNR	2032	Eliminada Enero 1974	749
71	Timotes IV	8°59'14.00"N, 70°44'20.00"W	1971; 1973; 1975 a 1983; 1986; 1988 a 1989; 1991 y 1995	MARNR	2089	En uso	866
72	Tovar I	8°20'30.00"N, 71°44'40.00"W	1944 a 1946; 1969 a 1975 y 1977 a 1993	MARNR	952	En uso	1120
73	Tovar II	8°20'00.00"N, 71°45'00.00"W	1950 a 1964; 1966 a 1968 y 1971 a 1973	MARNR	1046	Eliminada Enero 1974	889
74	Tovar-alcaldia	8°20'31.00"N, 71°45'00.00"W	1945; 1952 a 1957 y 1960 a 1962	MARNR	952	Eliminada Enero 1964	1112
75	Tovar-sabaneta	8°20'31.00"N, 71°44'27.00"W	1964 a 1968	MARNR	934	En uso	1133
76	Valle Grande	8°43'00.00"N, 71°05'00.00"W	1963 a 1965; 1967; 1969 a 1972; 1976 a 1980; 1982 a 1983 y 1986 a 1993	MARNR	2515	En uso	1600
77	Zea-La Florida	8°23'22.00"N, 71°46'42.00"W	1969 a 1992 y 1994 a 1995	MARNR	900	En uso	1266

Estaciones con registro de temperatura mínima

Nº Estación	Estacion	Coordenadas	Período de Tiempo - Registro considerado	Organismo Responsable	Altitud	Situación actual	Temperatura mínima Promedio del Período Considerado
1	Bailadores	8°15'10.00"N, 71°49'37.00"W	1941 a 1946	MARNR	1736	Eliminada Enero 1983	11.8
2	Estanquez	8°27'00.00"N, 71°31'00.00"W	1972 a 1976	ULA	462	En uso	19.4
3	Gavidia	8°40'06.00"N, 70°54'27.00"W	2000 al 2003	ICAE	3450	En uso	4.3
4	La Carbonera	8°38'00.00"N, 71°24'00.00"W	1970 a 1975	ULA	2240	En uso	8.5
5	La palmita	8°33'03.00"N, 71°36'02.00"W	1977, 1980, 1982 a 1983	MARNR	600	En uso	19.5
6	Los plantios	8°49'11.00"N, 70°47'05.00"W	1971,1975,1982 y 1983	MARNR	3878	En uso	1.5
7	Merida-aeropuerto	8°36'00.00"N, 71°11'00.00"W	1951 a 1965 ; 1971 a 1975 y 1980 a 1985	SMFAV	1479	En uso	13.3
8	mucubaji	8°48'10.00"N, 70°49'22.00"W	1970,1973, 1974 y 1979 a 1983	MARNR	3560	En uso	0.1
9	mucuchies I	8°44'53.00"N, 70°55'29.00"W	1941 y 1943 a 1945	MARNR	2850	En uso	3.1
10	Mucuchies II	8°46'00.00"N, 70°54'00.00"W	1963 a 1965 y 1972 a 1974	MARNR	3100	En uso	3.3
11	San Cristobal de Torondoy	9°07'00.00"N, 70°55'00.00"W	1943 a 1945	MARNR	1107	Eliminada Mayo 1946	18.6

Estaciones con registro de temperatura media

Nº Estación	Estacion	Coordenadas	Período de Tiempo - Registro considerado	Organismo Responsable	Altitud	Situación actual	Temperatura media Promedio del Período Considerado
1	Bailadores	8°15'10.00"N, 71°49'37.00"W	1941 a 1946	MARNR	1736	Eliminada Enero 1983	18.5
2	El Aguila	8°51'00.00"N, 70°49'37.00"W	1972 a 1976	ULA	4090	En uso	2.6
3	Estanquez	8°27'00.00"N, 71°31'00.00"W	1972 a 1976	ULA	462	En uso	24.4
4	Gavidia	8°40'06.00"N, 70°54'27.00"W	2000 al 2003	ICAE	3450	En uso	8.3
5	La Carbonera	8°38'00.00"N, 71°24'00.00"W	1970 a 1975	ULA	2240	En uso	12.8
6	La Hechicera	8°38'00.00"N, 71°14'00.00"W	1967 a 1971	ULA	1920	En uso	15.4
7	Los plantios	8°49'11.00"N, 70°47'05.00"W	1971,1975,1982 y 1983	MARNR	3878	En uso	8.1
8	Merida-aeropuerto	8°36'00.00"N, 71°11'00.00"W	1951 a 1985	SMFAV	1479	En uso	18.9
9	mucubaji	8°48'10.00"N, 70°49'22.00"W	1970,1973, 1974 y 1979 a 1983	MARNR	3560	En uso	6.2
10	mucuchies I	8°44'53.00"N, 70°55'29.00"W	1941 y 1943 a 1945	MARNR	2850	En uso	10.8
11	Mucuchies II	8°46'00.00"N, 70°54'00.00"W	1963 a 1965 y 1972 a 1974	MARNR	3100	En uso	11.2
12	San Cristobal de Torondoy	9°07'00.00"N, 70°55'00.00"W	1943 a 1945	MARNR	1107	Eliminada Mayo 1946	22.6

Estaciones con registro de temperatura máxima Temperaturas Máximas

Nº Estación	Estacion	Coordenadas	Registro considerado	Organismo	Altitud	Situación actual	Temperatura máxima Promedio del Período Considerado
1	Bailadores	8°15'10.00"N, 71°49'37.00"W	1941 a 1946	MARNR	1736	Eliminada Enero 1983	25.8
2	Estanquez	8°27'00.00"N, 71°31'00.00"W	1972 a 1976	ULA	462	En uso	29.2
3	Gavidia	8°40'06.00"N, 70°54'27.00"W	2000 al 2003	ICAE	3450	En uso	14.4
4	La Carbonera	8°38'00.00"N, 71°24'00.00"W	1970 a 1975	ULA	2240	En uso	17.2
5	La palmita	8°33'03.00"N, 71°36'02.00"W	1977, 1980, 1982 a 1983	MARNR	600	En uso	30.7
6	Los plantios	8°49'11.00"N, 70°47'05.00"W	1971,1975,1982 y 1983	MARNR	3878	En uso	15.2
7	Merida-aeropuerto	8°36'00.00"N, 71°11'00.00"W	1951 a 1965 ; 1971 a 1975 y 1980 a 1985	MARNR	1479	En uso	27.1
8	mucubaji	8°48'10.00"N, 70°49'22.00"W	1970,1973, 1974 y 1979 a 1983	MARNR	3560	En uso	14
9	mucuchies I	8°44'53.00"N, 70°55'29.00"W	1941 y 1943 a 1945	MARNR	2850	En uso	19.5
10	Mucuchies II	8°46'00.00"N, 70°54'00.00"W	1963 a 1965 y 1972 a 1974	MARNR	3100	En uso	19.1
11	San Cristobal de Torondoy	9°07'00.00"N, 70°55'00.00"W	1943 a 1945	MARNR	1107	Eliminada Mayo 1946	27.6