

Posibles efectos del calentamiento global sobre el nicho climático de algunas especies en los Andes Tropicales¹

por Francisco Cuesta-Camacho^{x^}, Manuel Peralvo^{^-} y Andrea Ganzenmüller[^]

^xCONDESAN-Proyecto Páramo Andino, ⁻University of Texas at Austin, [^]EcoCiencia

e-mail: F.Cuesta@cgjar.org

Nota: este documento es una síntesis del artículo publicado en Mena. P, Maldonado. G, (Editores). 2008. *Páramo y Cambio Climático*. # 23. *Serie Páramo*. Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador / EcoCiencia. Quito - Ecuador.

Introducción

Desde la última década del siglo pasado, la Biosfera está experimentando un cambio climático acelerado el cual, de acuerdo al informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) (McCarthy et al. 2001), continuará en el futuro. El calentamiento previsto de 1,4 a 5,8 °C para el período 1990-2100 (IPCC 2006) podría alterar drásticamente los patrones conocidos de la biota en la Tierra. Estudios recientes sobre esta temática (Broennimann et al. 2006; Thuiller et al. 2006; Araújo et al. 2005a; Araújo et al. 2005b; Pearson y Dawson 2003; Bakkenes et al. 2002; Peterson et al. 2001) concuerdan en el hecho de que el incremento en el calentamiento global afecta a la biodiversidad en diferentes escalas y de diversas formas tales como: a) variaciones en los rangos de especies y en la composición de las comunidades, b) desplazamientos altimétricos y/o latitudinales de comunidades vegetales o ecosistemas, y d) cambios en el funcionamiento de los ecosistemas.

En la escala de especies, tres respuestas generales podrían ocurrir debido a las anomalías climáticas: desplazamiento, adaptación (ya sea en términos de cambios evolutivos o adaptaciones fisiológicas) o extinción local (Holt 1990; Peterson et al. 2001). Es posible que los efectos del cambio climático a escala local pudieran reflejar las interacciones de estos tres mecanismos y derivar en alteraciones en las composiciones y funciones de las comunidades vegetales de los ecosistemas alto-andinos. Por ejemplo, desplazamientos abruptos en la distribución de especies pueden resultar

¹ Este manuscrito es parte de un estudio mayor que actualmente se encuentra en revisión para una revista internacional arbitrada. Debido a las cláusulas de autoría y propiedad intelectual, nos es imposible incluir el contenido completo.

en altas tasas de extinción así como importantes modificaciones en la fenología y fisiología de las especies (Parmesan y Yohe 2003).

En este contexto, se espera respuestas idiosincrásicas a estos escenarios de cambio global que dependerán en gran parte de las características fisiológicas y evolutivas de las especies estudiadas (Broennimann et al. 2006). Es posible una mayor probabilidad de extinciones locales para las especies que tienen una distribución restringida (por ejemplo endémicas). En otras palabras, las especies que ocupan un área marginal en relación con su nicho en un área determinada serán las más vulnerables a cambios climáticos futuros (por ejemplo la desaparición del nicho climático). Por el contrario, especies que ocupan un nicho coincidente (por ejemplo aquellas especies con distribuciones amplias) con las condiciones prevalecientes en la región se verán probablemente menos afectadas (Thuiller et al. 2005).

Las proyecciones en las anomalías climáticas no son uniformes en la Tierra (IPCC-TGCIA 2006). Los registros climáticos provenientes de varias regiones montañosas (p. ej. Alpes, Himalayas) muestran indicios claros que la amplitud en las variaciones de temperatura en los ambientes de montaña durante el último siglo ha sido mayor que el observado a escala global o regional (Beniston et al. 1997). Así, aparentemente los impactos de las alteraciones climáticas en las distribuciones de especies serán proporcionalmente más perceptibles en los ecosistemas de montaña que en las zonas bajas. Adicionalmente, es probable que la severidad de estos impactos se intensifique debido a la alta proporcionalidad de especies de rango restringido que conforman estos ecosistemas.

De acuerdo con las proyecciones del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés) el rango de modelos climáticos predice un incremento en la temperatura promedio de la superficie del planeta entre 1,4° C a 5,8° C para el período 1990-2100 (0,1 a 0,4 °C por década). En los Andes del Norte, se proyecta que la temperatura promedio anual se incrementará a una tasa de 0,73° C por década (de acuerdo al modelo HadCM3 en el escenario A2 para el año 2080), llegando a un incremento total de 5,8° C para el año 2080 en algunas lugares de esta región (Hulme y Serrad 1999). Estos datos sugieren un escenario que provocaría una alta tasa de extinción de especies en los Andes del Norte. Todos los ecosistemas se verían afectados por el cambio climático, pero los de la alta montaña, situados por encima del límite superior de la vida arbórea, se consideran particularmente sensibles a dicho calentamiento puesto que están condicionados por las bajas temperaturas (Pauli et al. 2005).

En este estudio modelamos las respuestas en los rangos de distribución de algunas especies en los Andes del Norte en diferentes escenarios de cambio climático. Nuestro principal objetivo fue evaluar los posibles impactos del cambio climático (en dos escenarios de cambio) en el nicho ambiental de un grupo de aves y plantas vasculares de origen andino para los años 2050 y 2080.

Área de estudio

Los Andes Tropicales cubren un área de 490.000 km² y se extienden sobre 2.000 km de desde los 11 ° N en la Sierra Nevada en el norte de Colombia hasta los 6 ° S en el Abra de Porculla - depresión de Huancabamba - en el norte del Perú (Figura 1).

Esta región está conformada por 14 ecorregiones que incluyen 7 variedades de bosques montanos, tres de bosques deciduos, y cuatro tipos de páramos (WWF 2001). Los bosques montanos ocurren en ambos lados de las cordilleras de los Andes y cubren la mayor superficie del área de estudio mientras que los sistemas paramunos aparecen de manera dispersa - en una suerte de islas - en las cimas de las montañas andinas rodeados de una matriz de bosques de niebla. Los bosques deciduos están restringidos a las porciones inferiores de los valles interandinos siguiendo los cauces de ríos como el Magdalena, Guayllabamba y Marañón.

Los patrones climáticos en los Andes Tropicales están determinados por las interacciones entre temperatura y precipitación, las cuales controlan las dinámicas de otros factores tales como la humedad. Los patrones de variación de la temperatura en los Andes son relativamente homogéneos entre las subregiones y presentan una fuerte relación con el gradiente altitudinal. En contraste, los patrones de precipitación son complejos y no están necesariamente relacionados con el gradiente altimétrico. Las variaciones regionales en la precipitación están asociadas con efectos orográficos producidos por la abrupta topografía de los Andes.



Figura 1. Área de estudio: los Andes tropicales.

Los vientos provenientes del Pacífico y el Atlántico mantienen una humedad constante en ambos flancos externos de las cordilleras andinas mientras que los flancos interiores muestran condiciones más variables. Las porciones superiores de los flancos interiores interceptan nubes cargadas de humedad y reciben una importante condensación manteniendo una condición húmeda siempre-verde, mientras que las porciones medias e inferiores de los valles presentan un marcado patrón bimodal seco-húmedo debido al efecto de la sombra de lluvia (Kattan et al. 2004). Adicionalmente, el efecto de sombra de lluvia influye en la duración de la estación seca, la cual tiende a incrementar al interior de los valles interandinos y en los extremos norte y sur del área de estudio. Las temperaturas varían desde climas calientes y estables en el piedemonte amazónico y del Orinoco, pasando por un rango de climas temperados hasta condiciones subárticas en las partes más altas de la región (Fjeldsá y Krabbe, 1990; Vuilleumier y Monasterio 1986).

Métodos

Ocurrencias de las especies estudiadas

Colectamos información sobre ocurrencias (registros de museos y herbarios) para 202 plantas vasculares y 167 especies de aves provenientes de diferentes museos, herbarios y colecciones privadas. El conjunto de especies seleccionadas está lejos de ser completo y representativo de los patrones generales de diversidad de los Andes Tropicales, sin embargo, representan un buen ejemplo de los posibles efectos que el cambio climático podría tener sobre la biodiversidad andina.

Posteriormente, solamente las especies que tuvieron un mínimo de 15 ocurrencias o más fueron seleccionadas. 102 especies de plantas vasculares y 125 especies de aves. para construir su nicho climático utilizando técnicas de modelamiento estadístico. La selección de un tamaño de muestra de 15 ocurrencias se considera como un mínimo de datos para producir un modelo predictivo robusto y el hecho de que la mayoría de las especies tuvieron muy pocas ocurrencias independientes.

Variables climáticas

Para construir los modelos climáticos de nicho utilizamos el conjunto de datos climáticos globales CRU TS 2.1 (Mitchell y Jones 2005) para representar el clima actual y para derivar ocho variables consideradas importan-

tes factores limitantes en la distribución de plantas y aves en los Andes (Leimbeck et al. 2004; Parra et al. 2004; Vargas et al. 2004). Las variables seleccionadas fueron la temperatura mensual promedio de la máxima diaria (Tmax), el rango diurno de temperatura (dtr), humedad relativa (rh), cobertura de nubes (cld), presión de saturación de vapor (vap), precipitación promedia anual (pre), punto de rocío (dew), la temperatura mensual promedio de la mínima diaria (Tmin).

Todas las variables climáticas del CRU TS 2.1 fueron originalmente desarrolladas a una resolución espacial de 0.5°. Para el propósito de este estudio, incrementamos la resolución de estas coberturas a 1 km utilizando una técnica de interpolación basada en regresiones múltiples (*Thin plate smoothing splines*: ANUSPLIN, Hutchinson 2000). Utilizamos tres variables independientes para realizar la interpolación de las superficies climáticas: longitud, latitud y elevación (1 km de resolución). La elevación fue incluida debido a que generalmente está altamente correlacionada con la temperatura, por lo que su inclusión reduce el error estadístico (Hutchinson 1991). Utilizamos un modelo digital de elevación (MDE) desarrollado por la Misión Topográfica Radar (SRTM por sus siglas en inglés) a una resolución de 90 m (disponible en <http://seamless.usgs.gov>) y remuestreado a 1 km de resolución. Las predicciones climáticas futuras para el 2050 y 2080 fueron obtenidas del modelo TYN SC 2.0 (Mitchell et al. 2004) para los escenarios A1, A2, B1 y B2 del IPCC (Nakicenovic y Swart 2000). Las variables derivadas de estos escenarios fueron también interpoladas a un 1 km de resolución.

Modelos de nicho climático (MNC)

Para la construcción de los MNC utilizamos una técnica asimétrica debido a que registros de ausencia para las especies seleccionadas no existen, como es el caso de otras regiones tropicales poco estudiadas (Raxworthy et al. 2003; Anderson et al. 2002a; Anderson et al. 2002b). En este contexto, las técnicas de modelamiento que requieren solo puntos de presencia son muy útiles (Graham et al. 2004; Loiselle et al. 2003). Los MNC fueron desarrollados utilizando MAXENT, un algoritmo de aprendizaje (*machine learning algorithm*) basado en la teoría de la máxima entropía (Elith et al. 2006; Phillips et al. 2006). Corrimos MAXENT utilizando un umbral de *convergencia* de 10^{-5} con 1000 iteraciones como un límite superior para cada corrida. Para cada especie, el 75% de los registros de ocurrencia fueron utilizados como puntos de entrenamiento y el 25% como puntos de validación. Los MNC desarrollados utilizando las condiciones climáticas actuales

fueron posteriormente utilizados para generar las proyecciones futuras bajo los escenarios HadCM3 A2 y B2 para los años 2050 y 2080.

Los puntos de validación fueron utilizados para evaluar la exactitud de cada modelo utilizando el área bajo la curva (AUC) de la curva ROC (análisis de sensibilidad y especificidad); (Phillips et al. 2006; Guisan y Zimmermann 2000). El AUC mide la habilidad del modelo de discriminar entre sitios donde la especie está presente, versus donde está ausente (Hanley y McNeil 1983). El AUC fluctúa entre 0 y 1, en donde un valor de 1 indica perfecta discriminación, un valor de 0,5 implica que la discriminación predictiva entre sitios no es mejor que una selección al azar, y un valor menor a 0,5 indica un desempeño inferior que el azar.

Medidas de sensibilidad al cambio climático

Para estimar la sensibilidad de cada especie al cambio climático, contrastamos los nichos climáticos presentes con los futuros y calculamos el porcentaje de píxeles que permanecen siendo adecuados para cada especie en ambos casos en relación al número total de píxeles definidos como hábitat en el modelo de nicho actual (nicho climático estable); (Peterson et al. 2001; Loehle y LeBlanc 1996).

Adicionalmente, la ganancia y pérdida del nicho climático fueron calculadas como el porcentaje de píxeles predichos en transformarse en hábitat adecuado o no respectivamente en el nicho climático futuro en relación al total de píxeles que conforman el nicho climático actual (Broennimann et al. 2006).

El cambio de rango de las especies fue calculado como la diferencia entre la pérdida de nicho y la ganancia. Esta estimación representa el porcentaje de expansión o contracción del rango en relación al nicho climático actual de cada especie bajo cada escenario y para cada punto en el tiempo. Se ha sugerido que la historia de vida de cada especie influencia las respuestas individuales al cambio climático (Broennimann et al. 2006). Por lo tanto, agrupamos a las especies de plantas de acuerdo a su historia de vida y a las especies de aves de acuerdo a su gremio trófico. Sin embargo, este estudio no distinguió las distintas capacidades de dispersión entre las especies seleccionadas, características de su historia evolutiva y perfiles ecológicos. Por lo tanto, los datos de sensibilidad de cada especie y la variación de su nicho climático entre escenarios asumen una dispersión universal de cada una de ellas. Esto quiere decir que consideramos que una especie .

cualquiera de ellas. puede desplazarse sin restricciones dentro del área de estudio para alcanzar a la nueva localización de su nicho climático.

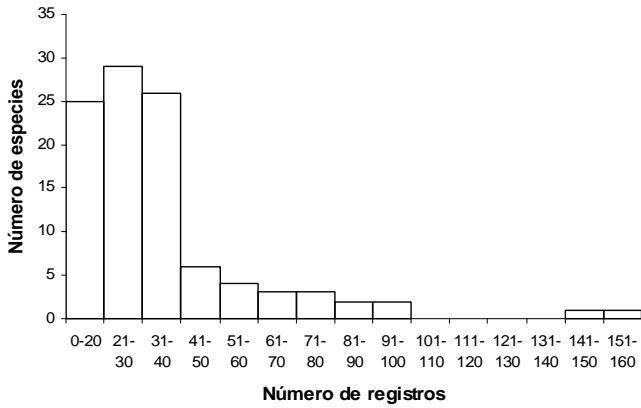
Por último, los cálculos estimados sobre la pérdida de nicho climático de las condiciones actuales en relación al 2050 y 2080 fueron utilizados para estimar un riesgo de extinción de las especies analizadas en los Andes Tropicales. Asignamos a cada especie una categoría de vulnerabilidad de acuerdo a las especificaciones de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN 2001). Basados en el criterio A3(c) de las listas rojas de UICN, los siguientes límites fueron utilizados para asignar a cada especie una categoría de vulnerabilidad: Extinta (EX): especies proyectadas en perder su nicho climático en un 100% en un lapso de 50 a 80 años; En Peligro Crítico (CR): pérdida proyectada del rango > 80%; En Peligro (EN): pérdida proyectada del rango > 50%; Vulnerable (VU): pérdida proyectada del rango > 30%; Casi Amenazada (NT): pérdida proyectada del rango < 30%; y de menor preocupación (LC): pérdida proyectada del rango de 0%.

Resultados

Modelo climático de nichos presentes y futuros

Desarrollamos 227 MCN (102 especies de plantas y 125 especies de aves) basados en 3535 y 4432 registros de ocurrencia para las especies de plantas y aves respectivamente. Del número total de especies de plantas y aves, 28% y 23% respectivamente tenían menos de 20 registros de ocurrencia (Figura 2).

(a)



(b)

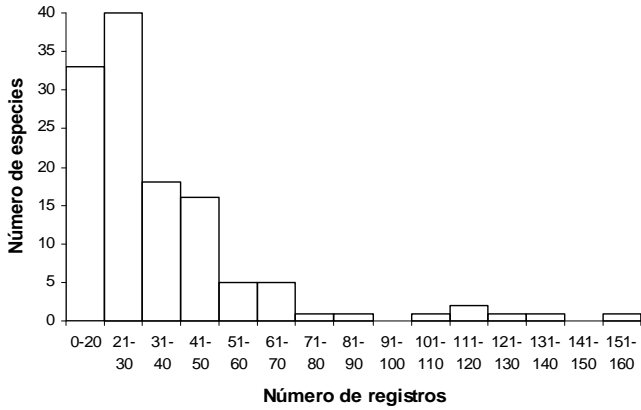


Figura 2. Histograma del número registros para (a) especies de plantas y (b) especies de aves. Los puntos de registros representan aquellos usados para construir los MNC en MAXENT.

En general MAXENT tuvo un buen desempeño al modelar el nicho climático de las especies seleccionadas. El estadístico AUC de los puntos de validación muestra un alto grado de exactitud de los modelos predictivos para aves (media = 0,90; Sd = 0,08) así como para plantas (media = 0.93; Sd = 0,07); (Figura 3).

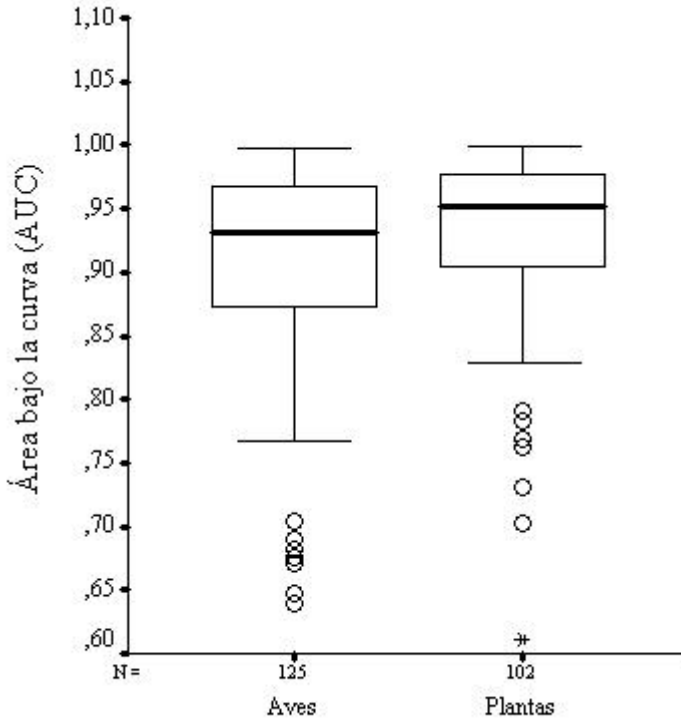


Figura 3. Sinopsis del área bajo la curva (AUC) obtenida para los MNC utilizando los registros de validación (30% del set total). AUC 0.9-1.0 (excelente); 0.8-0.9 (bueno); 0.7-0.80 (regular); 0.6-0.7 (pobre); 0.5-0.6 (malo). Los *boxplot* indican la exactitud del modelo para plantas y aves. Las cajas indican el rango intercuartil de los datos mientras que las patillas simbolizan los centiles 5 y 95. Los círculos y asteriscos representan valores *outliers* y extremos.

Cambio de rango

Los cambios en el rango del nicho climático de las especies para el 2050 y 2080 muestran patrones distintos de respuestas de acuerdo a las características de vida de las especies y los escenarios de cambio climático. Mientras que la mayoría de las especies de plantas y aves demuestran efectos negativos a través de la contracción de su nicho climático, algunas especies también muestran una expansión de su nicho climático (Figura 4).

Mientras que los dos escenarios para el 2050 (A2 y B2) son bastante similares, el escenario A2 para el 2080 genera cambios mucho más severos que el escenario B2 para las especies de plantas y aves (Figura 4). En el escenario A2 67 especies de las 125 (54%) sufren una contracción de su nicho climático, y 18 de ellas se espera sufran una variación negativa de su distribución mayor al 80%. En el escenario B2 se proyecta que el 71% de las especies atraviesen por una contracción de su nicho climático pero solo ocho especies sufran una variación negativa mayor al 80%. En el escenario B2 2080, el rango intercuartil de los datos muestra una variación negativa de todo tipo de formas de vida, mientras que en el escenario A2 2080 existe una notoria expansión de los rangos del cuartil superior y de los valores extremos de todas las formas de vida, especialmente de las epífitas (Figura 4a).

En el caso de las plantas, para el año 2050, el promedio de pérdida de los nichos climáticos actuales es del 46% (Sd = 28,42%) y 49% (Sd = 28,77%) bajo los escenarios A2 y B2 respectivamente. Por otro lado, la ganancia o expansión del nicho climático para los escenarios equivalentes para el mismo período de tiempo están en el orden de 25% (Sd = 53%) y 39% (Sd = 80%) respectivamente. Los altos valores de las desviaciones estándar sugieren una respuesta idiosincrásica al cambio climático en la escala de especies. En contraste, los rangos promedios de cambio a la escala agregada de formas de vida revelan patrones más consistentes para ambos escenarios para el período 2050 (Figura 4a).

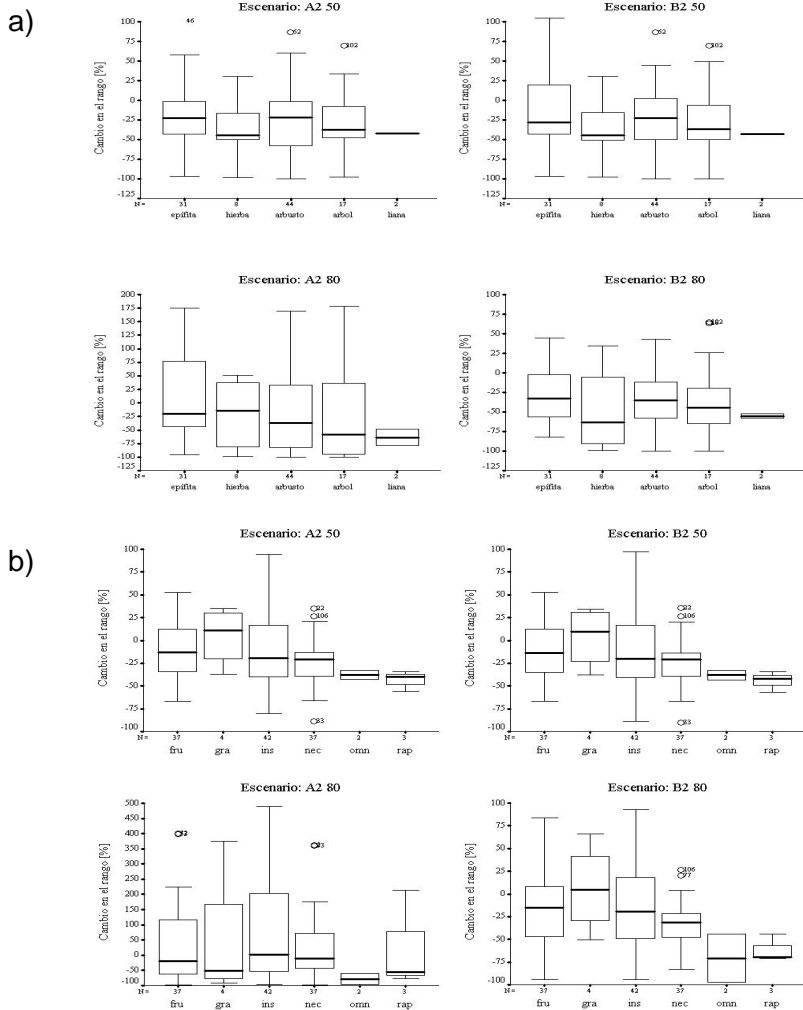


Figura 4. Cambio en el rango del nicho climático actual y el período 2050 y 2080 para dos escenarios de emisión A2 y B2: (a) plantas, (b) aves. Las medianas de los rangos de cambio se muestran (líneas horizontales negras) con su respectivo 95% de intervalo de confianza (boxplots). Las cajas indican el rango intercuartile de los datos mientras que las patillas simbolizan los centiles 5 y 95. Los círculos y asteriscos representan valores outliers y extremos. Fru: frugívoros; Gra: granívoros; Ins: insectívoros; Nec: nectarívoros; Omn: omnívoros; Rap: raptores.

En cuanto a los gremios tróficos, los cambios promedios en los rangos climáticos muestran importantes diferencias entre gremios para cada escenario analizado. Los granívoros en particular muestran una constante variación positiva en el cambio de su nicho climático para los dos escenarios en los dos períodos analizados, mientras que el resto de grupos muestran una variación negativa de su nicho climático en el escenario menos extremo (B2 2050). Por otro lado, el escenario más extremo (A2 2080) tiene un profundo impacto en la configuración de los nichos climáticos de las especies de aves. La mayoría de las especies sufren un incremento en su nicho climático con una expansión extrema de los gremios de insectívoros y granívoros (Figura 4b).

Estimación del riesgo de extinción en los Andes Tropicales

Bajo el supuesto de una migración universal, 59% y el 37% de las especies de plantas y aves respectivamente estaría clasificadas como extintas o en peligro crítico de acuerdo al escenario A2 2080. Solamente el 9% y el 25% de las especies seleccionadas de plantas y aves serán categorizadas como LC o NT. Estos números decrecen para otros escenarios y modelos climáticos (Figura 5). Estas estimaciones del porcentaje de especies bajo las categorías EX o CR podrían ser subestimaciones de los valores posibles para los escenarios modelados. Muchas más especies podrían estar en peligro crítico o extintas si es que escenarios más restrictivos (y realistas) en cuanto a mecanismos de dispersión fuera empleados, y el efecto actual y futuro de los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo fueran considerados.

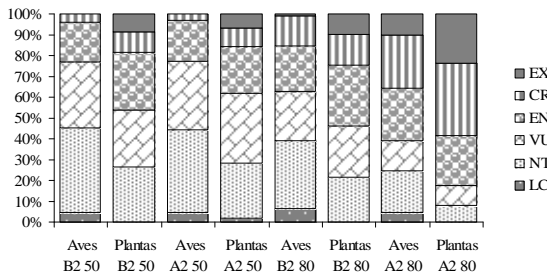


Figura 5. Proporción de las especies clasificadas de acuerdo al criterio A3(c) de la lista roja de la UICN para los dos períodos de tiempos utilizando los dos escenarios de emisión. EX. extinta; CR. En peligro crítico; EN. En peligro; VU. Vulnerable; NT. Casi amenazada; LC. De menor importancia.

Sensibilidad de las especies andinas a los efectos del cambio climático

Nuestros resultados muestran que los efectos del cambio climático sobre la biota andina podrían ser extremadamente severos. El efecto de las anomalías climáticas en los Andes tropicales, en la escala de especies, muestra patrones similares para las aves y plantas estudiadas. En general existe una consistente contracción de los nichos climáticos de las especies que varía entre el 28% para plantas y el 18% para las aves en el escenario B2 para el período 2050 a 36% y 27% respectivamente en el escenario A2 para el período 2080 (Figura 3). Un patrón importante es que la mayoría de las especies que sufrirían considerables pérdidas son en su mayoría especies climáticamente marginales restringidas a los páramos o a los valles xerofíticos de la región. Sin embargo, las mediciones de sensibilidad presentadas aquí son sujetas a una fuente principal de incertidumbre: la selección de los modelos climáticos para evaluar el impacto del cambio climático en la escala de especies.

Todas las proyecciones usadas para el presente análisis están basadas en el modelo climático global HadCM3 (escenarios de emisión B2 y A2); para otros modelos climáticos, las proyecciones espaciales de las variaciones climáticas podrían ser distintas de las presentadas en este estudio. Sin embargo, la utilización de modelos climáticos distintos podrían cambiar la magnitud pero no la dirección (incremento frente a detrimento) de los efectos generales sobre la biota andina (Ohlemüller et al. 2006). Adicionalmente, el modelo climático HadCM3 y los escenarios B2 y A2 fueron seleccionados para permitir comparación de resultados con estudios similares (por ejemplo Broennimann et al. 2006; Thuiller et al. 2005) en diferentes regiones del planeta.

Estimación del riesgo de extinción en los Andes Tropicales

El origen y el actual arreglo espacial de la mayoría de las especies andinas utilizadas en este estudio fueron influenciados por las fluctuaciones climáticas del Plioceno-Pleistoceno (Luteyn, 2002; Young et al. 2002). Las fluctuaciones climáticas, especialmente los ciclos glaciales-interglaciales del Pleistoceno tuvieron una fuerte influencia en los procesos de radiación y especiación de los taxones andinos. Fjeldså (1995), Roy et al. (1997), Krabbe et al. (1998), y Arctander y Fjeldså (1997) sugieren un modo de especiación dominado por procesos dinámicos de aislamientos locales en ecosistemas montanos climáticamente estables con dispersiones ocasio-

nales entre ellos. Estos reductos climáticos pudieron haber jugado un papel de refugios de la biota andina y se los ha definido como *áreas ecológicas estables*. Dado que se estima que estos refugios fueron de tamaño pequeño, las poblaciones de animales y plantas que los ocupaban debieron ser pequeñas también (Bradshaw et al. 1995). Como consecuencia, muchas de estas *reoe-especies* presentes en ecosistemas andinos son endémicas, adaptadas a condiciones ambientales muy específicas en conjunción con un rango de distribución restringido (Kattan et al. 2004). Estas condiciones muestran un escenario perfecto para que ocurra una alta extinción y anomalías en los patrones de distribución de estas especies en escenarios de anomalías climáticas.

En este contexto, la pérdida de porciones considerables del nicho climático de estas especies nos induce a clasificar a una gran cantidad de ellas como en peligro crítico o incluso extintas. La declinación en el tamaño del nicho climático de estas especies, implica que eventos estocásticos pequeños podrían afectar una gran parte de su población total, especialmente en paisajes fragmentados como los Andes. Si una especie termina restringida a un número pequeño de sitios o eventos catastróficos de pequeña escala podrían terminar en extinciones locales (With y King 1999; Opdam 1991).

Por otro lado, nuestros resultados pueden ser conservadores dado el supuesto de migración universal aplicado, y las tasas de pérdida de cobertura vegetal para los Andes Tropicales que no fueron incluidas en los análisis realizados. Por lo tanto, los impactos futuros de las anomalías climáticas podrían ser incluso mayores a los reportados debido al alto grado de fragmentación (natural y humano) a la escala de paisaje. La pérdida de hábitat y la fragmentación es especialmente rápida en los flancos exteriores, donde fronteras recientes de deforestación se han desarrollado a lo largo de la estructura vial recientemente creada (y en continua expansión) y por las dinámicas propias de los procesos de colonización en los piedemontes andinos (Young 1998).

Bibliografía

- Anderson, R.P., M. Gómez-Laverde y A.T. Peterson. 2002a. Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: insights from predictive models. *Global Ecology and Biogeography* 11: 131-141.
- Anderson, R.P., D. Lew y A.T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.

- Anderson, R.P., E. Martinez-Meyer. 2004. Modeling species geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*, 116, 167-179.
- Anderson, R.P., A.T. Peterson y M. Gómez-Laverde. 2002b Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. *Oikos* 98: 3-16.
- Araújo, M., B. R.G. Pearson, W. Thuiller y M. Erhard. 2005a. Validation of species climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11: 1504-1513.
- Araújo, M.B., R.J. Whittaker, R.J. Ladle y M. Erhard. 2005b. Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography* 14: 529-538.
- Arctander, P. y J. Fjeldså. 1997. Andean Tapaculos of the Genus *Scytalopus* (Rhinocryptidae): A study of speciation using DNA sequence data. In: *Conservation Genetics*. Loeschcke V, Tomiuk y S.K. Jian (eds.), pp. 205-225. Birkhauser Verlag. Basilea.
- Bakkenes, M., J.R.M. Alkemade, F. Ihle, R. Leemans y J.B. Latour. 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* 8: 390-407.
- Beniston, M., H.F. Diaz, y R.S. Bradley. 1997. Climatic Change at High Elevation Sites: An Overview. *Climatic Change* 36: 233-251.
- Bradshaw, H.D., S.M. Wilbert, K.G. Otto y D.W. Schemske. 1995. Genetic mapping of floral traits associated with reproductive isolation in monkeyflowers (*Mimulus*). *Nature* 376: 762-765.
- Broennimann, O., W. Thuille, G. Hughes, G.F. Midgley, J.M.R. Alkemade y A. Guisan. 2006. Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology* 12: 1079-1093.
- Casares, C, K. Boyla e I. Davidson. 2003. Threatened birds of the America . The ICBP/UICN Red Data Book. Smithsonian Institution Press, Washington and London. In cooperation with the International Council for Bird Preservation. Cambridge.
- Elith J, C.H. Graham, R.P. Anderson et al. 2006. Novel methods to improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129-151.
- Fjeldså J. 1995. Geographical patterns of neoendemic and older relict species of Andean forest birds: the significance of ecologically stable areas. *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forests - proceedings of the Neotropical Montane Forest Biodiversity*

- and Conservation Symposium. The New York botanical Garden. Nueva York.
- Fjeldså J. y N.,Krabbe. 1990. Birds of the High Andes . A manual to the birds of the Temperate Zone of the Andes and Patagonia, South America. University of Copenhagen and Apollo Books. Svendborg.
- Graham C.H., S.R.Ron, J.C. Santos, C.J.Schneider y C. Moritz. 2004. Integrating Phylogenetics and Environmental Niche Models to Explore Speciation Mechanisms in Dendrobatid Forgs. *Evolution*, 58, 1781-1793.
- Guisan A. y,N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- Hanley J.A. y B.J. McNeil. 1983. A method of comparing the areas under receiver operating characteristic curves derived from the same cases. *Radiology*, 148, 839-843.
- Holt R.D. 1990. The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 5, 311-315.
- Hulme, M. y N. Serrad.1999. Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte. Unidad de Investigación Climática. Reino Unido.
- Hutchinson M.F. 1991. Climatic analyses in data sparse regions. In:Climatic risk in crop production (eds Muchow RC, Bellamy A), pp. 55-71. CAB.
- Hutchinson, M.F. 2000. Anusplin, ver. 4.1. User guide. The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies. Canberra.
- Hutchinson, M.F. 1995. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Science*, 9, 305-403.
- IPCC-TGCI. 2006. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 75-105. Cambridge University Press. Cambridge.
- IUCN. 2001. IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. Gland y Cambridge.
- Kattan, G., O.L. Hernández, I. Goldstein et al. 2004. Range fragmentation in the spectacled bear *Tremarctos ornatus* in the northern Andes. *Oryx*, 38, 155-163.
- Krabbe, N., F. Skov, J. Fjeldså e I.K. Petersen.1998. Avian diversity in the Ecuadorian Andes. Centre for Research on Cultural and Biological Diversity of Andean Rainforest (DIVA). pp. 1-143. DIVA Technical Report. Dinamarca.

- Leimbeck, R., Valencia y H. Balslev. 2004. Landscape diversity patterns and endemism of Araceae in Ecuador. *Biodiversity and Conservation*, 13, 1755-1779.
- Loehle, C., LeBlanc, D. 1996. Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review. *Ecological Modelling*, 90, 1-31.
- Loiselle, B.A., C.A. Howell C.H. Graham, J.M. Goerck, T. Brooks, K.G. Smith, P.H. Williams. 2003. Avoiding Pitfalls of Using Species Distribution Models in Conservation Planning. *Conservation Biology*, 17, 1591-1600.
- Luteyn, J.L. 2002. Diversity, Adaptation, and Endemism in Neotropical Ericaceae: Biogeographical Patterns in the Vaccinieae. *The Botanical Review*, 68, 55-87.
- MBG. 2004. W³ TROPICOS, rev. 1.5. Missouri Botanical Garden Database (MOBOT). San Luis.
- McCarthy, J.J., O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken y K. S. White. 2001. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Mitchell, T.D., T.R. Carter, P.D. Jones, M. Hulme y M. New. 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). pp. 1-30. Tyndall Working Paper, Tyndall Centre, UEA. Norwich.
- Mitchell, T.D. y P.D. Jones. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, 693-712.
- Nakicenovic, N. y R. Swart. 2000. *Emissions Scenarios, Special Report of the Intergovernmental Panel on ClimateChange*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Ohlemüller R., E.S. Gritti, M.T. Sykes, C.D. Thomas. 2006. Quantifying components of risk for European woody species under climate change. *Global Change Biology*, 12, 1788-1799.
- Opdam, P. 1991. Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holarctic breeding bird studies. *Landscape Ecology*, 5, 93-106.
- Parmesan, C. y G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Parra, J.L., C.H. Graham y J.F. Freile. 2004. Evaluating alternative data sets for ecological niche models of birds in the Andes. *Ecography*, 27, 350-360.
- Pearson, R.G. y T.P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361-371.

- Peterson, A.T., V. Sánchez-Cordero, J. Soberon, J. Bartley, R.W. Budde-
meier y A.G. Navarro-Siguenza. 2001. Effects of global climate
change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecologi-
cal Modelling*, 144, 21-30.
- Peterson, A.T. y D.A. Vieglais. 2001. Predicting Species Invasions Using
Ecological Niche Modeling: New Approaches from Bioinformatics
Attack a Pressing Problem. *BioScience*, 51, 363-371.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson y R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy
modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*,
190, 231-259.
- Raxworthy, C.J., E. Martínez-Meyer, N. Horning, R.A. Nussbaum, G.E.
Schneider, M.A. Ortega-Huerta y A.T. Peterson. 2003. Predicting
distributions of known and unknown reptile species in Madagascar.
Nature, 426, 837-841.
- Roy, M.S., J.M. Cardoso da Silva, P. Arctander, J. García-Moreno y P.
Fjeldsa. 1997. The speciation of South American and African birds
in montane regions. In: *Avian molecular evolution and systematics*
(ed Mindell DP), pp. 325-343. Academic Press, San Diego.
- Thuiller, W. 2004. Patterns and uncertainties of species' range shifts under
climate change. *Global Change Biology*, 10, 2020-2027.
- Thuiller, W., O. Broennimann, G. Hughes, J.M.R. Alkemade, G.F. Midgley
y F. Corsi. 2006. Vulnerability of African mammals to anthropogen-
ic climate change under conservative land transformation assump-
tions. *Global Change Biology*, 12, 424-440.
- Thuiller, W., S. Lavorel, M.B. Araújo y M.T. Sykes, Prentice IC (2005) Cli-
mate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of
the National Academy of Sciences*, 102, 8245-8250.
- Vargas, J.H., T. Consiglio, P.M. Jorgensen y T.B. Croat. 2004. Modelling
distribution patterns in a species-rich plant genus, *Anthurium* (Ara-
ceae), in Ecuador. *Diversity & Distributions*, 10, 211-216.
- Vuilleumier, F. y M. Monasterio. 1986. *High altitude tropical biogeography*.
Oxford University Press. Nueva York.
- With, K.A. y A.W. King. 1999. Extinction Thresholds for Species in Fractal
Landscapes. *Conservation Biology*, 13, 314-326.
- WWF. 2001. *Biodiversity vision for the Northern Ecoregional Complex*. pp.
1-80. World Wildlife Fund, Fudena, Fundación Natura. Santiago de
Cali.
- Young, K.R. 1998. Deforestation in landscapes with humid forests in the
Central Andes: patterns and processes. In: *Nature's Geography:
New Lessons for Conservation in Developing Countries* (eds Zim-
merer KS, Young KR), pp. 1-351. The University of Wisconsin
Press. Madison.

Young, K.R., C. Ulloa, J.L. Luteyn y S. Knapp. 2002. Plant Evolution and Endemism in Andean South America: An Introduction. *The Botanical Review*, 68, 4-21.

Discusión

Carlos Carrera

Dos preguntas: ¿Cuáles fueron las fuentes que tomaste para los puntos de distribución que consideraste? Y, ¿por qué no utilizaste anfibios que son un grupo conocido que está más o menos claro que tiene más relación con el cambio climático?

Francisco Cuesta

En realidad son dos preguntas que están directamente relacionadas con la información que utilicé. Utilicé la información del Instituto Nacional de Ciencias en Colombia. Para el caso de plantas utilicé la información del Missouri Botanical Garden, que ha compilado información del Museo de Aarhus, de la Universidad Católica, de los herbarios, del Museo de Historia Natural, del AMNH, de revisión de más de mil publicaciones, revisiones de grupos taxonómicos, en las cuales están los registros de localidades. Más o menos es una base de datos de 68000 registros de los cuales, en el caso de Birdlife Internacional, ellos nos dieron toda la base de datos de aves, razón por la cual se usó este grupo. No usamos anfibios porque esta información no estaba disponible. Cuando yo pedí a la Universidad Católica me dijeron que no. Creo que el resto ya sabes.

Rossana Manosalvas

Yo quería que tú nos aclares un poquito cuando hablas de que es información de un estudio preliminar. Has mostrado al final de tu presentación que existen algunas incertidumbres pero, ¿qué se podría usar de esta información para tomar ciertas precauciones, con la debida cautela, en términos de conservación a escala local, nacional o regional?

Francisco Cuesta

Bueno, sobre la primera parte de tu pregunta: ahora estamos empezando la segunda fase de este estudio donde estamos tratando de incorporar justamente la mejor alta de estas limitaciones, sobre todo para mejorar los patrones de riqueza. Especialmente para las especies de Colombia y los Andes venezolanos estamos tratando de ver qué posibilidades existen de mejorar la información climática. Eso sería mucho más interesante hacerlo con la gente que sabe hacerlo, es decir, el INAMHI o el IDEAM de Colombia si es que fuera posible. Otra cosa importante es obviamente incorporar los modelos de la parte de uso del suelo, y entender mejor lo que le está pasando al paisaje como tal para esos mismos años (esperamos tener datos para enero del próximo año). Sobre las otras cosas, creo que mas allá de tener todas estas limitaciones e incertidumbres, lo que es evidente es que si esto se da, habrían desplazamientos de especies. En este sentido, una cosa importantísima sería tratar de mantener la conectividad vertical ente páramos y bosques, e identificar cuáles son estas áreas más críticas que nos permitiría tener un mosaico de hábitat continuo desde los 500 hasta los 4500 msnm. Eso es básico. Independientemente de si es cierto, suponiendo que el 10% es cierto, debería permitirnos buscar escenarios de socios, no solo pensando en los sistemas nacionales, sino generar redes interconectadas de conservación en escenarios hipotéticos de desplazamientos a otras zonas. Sobre todo una cosa que es importante, es establecer programas de monitoreo de investigación a largo plazo en ecosistemas de montaña, que realmente nos permitan decir cuáles son estos indicadores. Puede ser por ejemplo que el pájaro que estamos usando porque tenemos registros, no es un buen indicador, y tal vez son mejores los frailejones. Esas cosas habría que concertarlas para que los indicadores que vamos a usar en Venezuela sean los mismos que están en Ecuador, Perú y Colombia, y monitorearlos a largo plazo para poder decir efectivamente lo que está pasando, lo que ya se puede constatar. Por ejemplo, en Inglaterra donde hay 50 años de monitoreo sobre este tema, existe un desplazamiento de casi 16 kilómetros costeros hacia el norte de la anidación de especies británicas. Existe también el ejemplo del desplazamiento

de los alces en los bosques canadienses. Esto solo se puede hacer con monitoreo y con investigación.

Janeth Ulloa

En el marco de lo que estabas diciendo, me gustaría que nos comentaras un poco más sobre las recomendaciones que tú podrías dar o sobre qué preocupaciones podríamos nosotros transmitir al gobierno nacional. Hemos visto que este, más allá de ser un tema de información, un tema tecnológico, es un tema de decisión política y actualmente está orientada toda la discusión a lo que podemos hacer individualmente. Esto me parece útil pero, cuando estamos planteando estas situaciones tan graves sobre los impactos que va a tener el país, ¿qué posiciones como país debemos tener, más allá de las cosas individuales, para tener información, para lograr otro tipo de beneficios, para poder enfrentar y entender, o buscar alternativas a estos problemas tan serios?

Francisco Cuesta

¡Qué complicado! La verdad es que no podría darte una respuesta porque creo que has entrado en un campo que para mí es un poco desconocido. Esta es la parte más política del asunto, y no quiero decir que no se tenga implicaciones, es más, debería tener implicaciones de ese tipo. Yo le pasaría la pelotita a la gente que hace gestión, y que trabaja sobre este tipo de cosas. La información está disponible. Usándola, obviamente con toda la cautela y con las incertidumbres que existen, esa gente debería tener la capacidad y el conocimiento de decir cómo y por donde ir en este sentido. Yo lo que ofrezco es participar en cualquier tipo de escenarios de discusión, pero no podría dar una respuesta muy seria al respecto.

Rubén Basantes

¿Se podría hacer o se podría aplicar esta metodología a escala local, a escala de país? ¿Cuál sería la escala recomendada para hacer este estudio, teniendo obviamente toda la información necesaria?

Francisco Cuesta

Primero, habría que plantearse cuales son las preguntas que se quiere contestar. Depende también de cuanta información tengas, esto es directamente relacionado a la información base con que se cuenta, es decir, si resulta que para una micro cuenca tienes 10 estaciones meteorológicas que han recopilado información durante 50 años, y es información de buena calidad, puedes generar probablemente unos modelos climáticos más finos a esa escala y también puedes identificar especies específicas a esa escala. Para este tipo de análisis probablemente todo va a depender de la cantidad de información que tengas, y mientras más fino se vaya, mientras más ventanas de detalle se abran, mejor. Estamos hablando de que probablemente el crecimiento de la necesidad de información es exponencial, algo así como la reproducción de los seres humanos en los últimos años. Uno de los grandes puntos de discusión es si es que para escenarios de cambio climático se puede o no incluir variables estáticas como por ejemplo geomorfología, considerando que necesitamos un modelo dinámico que cambie para poder proyectar la distribución futura. Ahí entras en otros escenarios de mucha mayor incertidumbre y complejidad.

Manuel Carvajal

¿Qué tipo de información meteorológica se utilizó y cuáles dificultades se encontró? ¿Fue una cuestión de cobertura espacial o hicieron falta parámetros meteorológicos?

Francisco Cuesta

Esa es una muy buena pregunta. La información que utilizamos es la información que ha sido recopilada del CRU. En términos generales el IPCC que es este panel de investigación del cambio climático, tiene diferentes nodos de investigación. Uno de estos nodos es la Universidad de East Anglia en el Reino Unido que ha recolectado mucha información a escala mundial de todas las estaciones meteorológicas. Ellos tienen un grupo de investigación climático que se ha dedicado los últimos 20 años a recolectar información de todas las estaciones meteorológicas disponibles a escala global. Sobre esta información y con todos los sesgos que existen, por ejemplo en la poca distribución de información para estaciones meteorológicas bajo mil metros a la Amazonía en el caso del Ecuador, todos estos problemas han sido heredados en estos modelos. La información a la que accedimos fue esa. Los escenarios de cambio provienen de

la misma fuente, y con base con ellos, con los puntos de distribución de todas las estaciones meteorológicas en los Andes, hicimos las interpolaciones actuales y futuras. No sé si en esto ayude un poco el software que usamos que se llama ANUSPLIN de la Universidad de Canberra en Australia, y que hace regresiones lineales múltiples. Lo que hicimos originalmente fue contactar al INAMHI, al IDEAM en Colombia, y al instituto que maneja este tipo de datos climáticos en el Perú, pero nunca tuvimos respuesta.