

**Modelamiento de la Distribución de los Nichos Adecuados para la Invasión Biológica del Retamo Espinoso (*Ulex europaeus*) en la Cuenca Alta del Río Bogotá, Vulnerabilidad y Escenarios Futuros.**

**Presentado por:  
Carlos Jaime Castillo Rodríguez**

**Carrera de Ecología  
Trabajo de grado para optar por el título de Ecólogo**

**Dirigido por:  
Andrés Etter**

**Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Estudios Ambientales y Rurales  
Carrera de Ecología  
Bogotá, Diciembre de 2008**

**Nota de aceptación**

---

**Dr. LUIS MIGUEL RENJIFO**

**Decano Académico**

---

**Dra. ANGELA AMARILLO**

**Directora Carrera Ecología**

---

**Dr. ANDRES ETTER**

**Director del Trabajo**

---

**ARMANDO SARMIENTO**

**Jurado**

---

**JUAN RICARDO GOMEZ**

**Jurado**

## **Agradecimientos**

A Dios por regalarme una vida privilegiada.

A mis padres por su incondicionalidad, a mi padre, a quien debo todo lo que soy y ofrezco todo lo que seré, a mi madre por colmar mi corazón de amor y convertirme en un hombre de bien.

A mi familia, mis abuelas; doña Elvira y doña Edna por criarme y malcriarme, doña Lelly por sembrar la intelectualidad en mí. A mis padrinos Alfredo y Diana por estar siempre ahí. A mi camada de hermanos por incentivarme a ser cada vez mejor.

A mis amigos y compañeros, a Carolina Laverde, mi *amor amor*, por atravesarse en mí camino y enamorarme. A Federico, mi hermano y cordada en el ascenso de la vida.

A los profesores, a mi director Andres Etter por intentar estructurar mis ideas. A Armando Sarmiento por su paciencia y generosidad intelectual.

## Resumen

La cuenca alta del río Bogotá ha sido sometida a una fuerte presión de ocupación humana y un proceso degradativo constante, convirtiéndola en un área altamente intervenida y fragmentada. Esta continua afectación a la funcionalidad y diversidad ecosistémica la convierte en un área vulnerable a la invasión biológica de especies. Este fenómeno es causa de la pérdida de biodiversidad biológica, además, de ir en detrimento de la producción de bienes y servicios ambientales, generando considerables impactos económicos y sociales.

El retamo espinoso (*Ulex europaeus*), es una de las cien especies invasoras más agresivas del mundo y está presente en la cuenca alta del río Bogotá, donde invade rápidamente sitios perturbados, formando matorrales densos e impenetrables. Compete exitosamente con plantas nativas gracias a su rápido crecimiento, capacidad de reproducirse tanto sexual como asexualmente, su prolífica producción de semillas, amplia capacidad dispersiva, efectiva defensa (fuertes espinas). Además, la capacidad de fijar nitrógeno que le permite colonizar todo tipo de suelos. Sus cualidades competitivas la convierten en una especie muy difícil y costosa de controlar o erradicar, por esto, la mejor manera de tratar con esta especie es a través de estrategias preventivas.

Entender la distribución de los nichos adecuados para el establecimiento del retamo espinoso, permitiría identificar los factores ambientales que limitan o favorecen su invasión. La implementación de un modelo estadístico basado en información biológica y ambiental confiable, genera una herramienta con un alto poder predictivo que permite identificar las áreas más vulnerables a una futura invasión.

## Palabras Clave

*Ulex europaeus*, Invasión Biológica, Cuenca Alta del Río Bogotá, Modelamiento de Distribución de Especies, Nicho, MAXENT.

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	8
2. Antecedentes .....	9
3. Objetivos .....	11
3.1 Objetivo General .....	11
3.2 Objetivos específicos .....	11
4. Marco Teórico .....	12
4.1 Transformación humana de los ecosistemas .....	12
4.1.1 Generalidades de la transformación. ....	12
4.1.2 Procesos de transformación en los ecosistemas Andinos .....	14
4.1.3 Procesos de transformación del paisaje en la cuenca alta del río Bogotá.....	15
4.2 Invasión biológica de especies vegetales .....	16
4.3 Transformación de los ecosistemas y la invasión biológica de especies .....	17
4.4 Ecología del paisaje y la invasión biológica .....	19
4.5 Biogeografía.....	20
4.6 Ecología de poblaciones invasoras.....	22
4.7 Ecología de la conservación y la invasión biológica de especies .....	23
4.8 Retamo espinoso ( <i>Ulex europaeus</i> ) .....	24
4.9 Impactos causados por la invasión biológica de especies vegetales .....	27
4.10 Modelamiento de la distribución de especies. ....	29
4.10.1 Generalidades del modelamiento .....	29
4.10.2 Modelo de distribución de especies MAXENT.....	31
4.10.3 Regresión logística.....	32
4.10.4 Sistema de información geográfica (SIG).....	33
5. Materiales y métodos .....	34
5.1 Area de estudio .....	34
5.1.1 Cuenca alta del río Bogotá.....	34
5.2 Procesos metodológicos.....	37
5.2.1 Fase 1: Recopilación de información secundaria.....	38
5.2.2 Fase 2: Trabajo de campo.....	39
5.2.3 Fase 3: Construcción de las capas ambientales .....	40
5.2.3.1 Generación de la matriz de correlación.....	44
5.2.4 Fase 4: Aplicación y calibración del modelo .....	45
6 Resultados .....	48
6.1 Areas con mayor probabilidad de presencia - invasión.....	48
6.2 Poder explicativo de las variables .....	49
6.2.1 Contribución porcentual de las variables. ....	49
6.2.2 Prueba Jackknife: Ganancia de los datos de entrenamiento .....	50

6.2.3 Distribución de la probabilidad de presencia – invasión en áreas protegidas.....	52
7. Discusión .....	53
7.1 Parámetro de ajuste.....	53
7.2 Variables ambientales de alta importancia estadística .....	53
7.2.1 Proximidad a vías .....	53
7.2.2 Precipitación y altitud.....	55
7.2.3 Radiación solar y cobertura.....	58
7.3 Variables ambientales de baja importancia estadística.....	60
7.3.1 Clima.....	60
7.3.2 Proximidad a ríos.....	61
7.3.3 Erosión .....	61
7.4 Distribución de la probabilidad de ocurrencia .....	63
7.5 Vulnerabilidad de la cuenca.....	64
7.6 Probabilidad de ocurrencia en areas protegidas.....	65
7.7 Limitaciones del estudio.....	66
8. Conclusiones.....	68
9. Bibliografía .....	70
10. Anexos.....	74
10.1 Pruebas Jackknife: Ganancia de los Datos de Prueba.....	74
10.2 Pruebas Jackknife para AUC.....	75
10.3 Mapa Distribución de la Probabilidad de Ocurrencia.....	76
10.4 Curvas de respuesta .....	77
10.5 Tabla formato complementario de campo.....	78
10.6 Mapa de grados de erosion.....	84
10.7 Mapa altitudinal .....	85
10.8 Tabla soporte teórico para las variables ambientales .....	86
10.9 Mapa modificacion del area de estudio .....	88
10.10 Tabla repeticiones de Maxent .....	89
10.11 Curvas de respuesta marginales .....	89
10.12 Mapa de Ubicación Altitudinal de las Areas Protegidas .....	90
10.13 Parámetros y valores para modelos MAXENT .....	91
10.14 Curva de la tasa de omisión y área predicha .....	92
10.15 Curva ROC .....	93

## Lista de tablas

Tabla 1. Procesamiento de capas ambientales.....	41
Tabla 2. Matriz de correlación.....	45
Tabla 3. Contribución de las variables ambientales .....	49

## Lista de Figuras

Figura 1. Distribución de <i>Ulex europaeus</i> en el mundo .....	25
Figura 2. Ubicación del área de estudio .....	35
Figura 3. Diagrama metodológico .....	37
Figura 4. Mapas de probabilidad de ocurrencia .....	48
Figura 5. Pruebas Jackknife: Ganancia de los datos de Entrenamiento.....	50
Figura 6. Distribución de nichos y áreas protegidas.....	52
Figura 7. Respuesta de <i>Ulex europaeus</i> a Proximidad a Vías .....	54
Figura 8. Respuesta de <i>Ulex europaeus</i> a la Precipitación .....	56
Figura 9. Altitud Vs. Probabilidad de Ocurrencia.....	57
Figura 10. Respuesta de <i>Ulex europaeus</i> a la Altitud.....	58
Figura 11. Respuesta de <i>Ulex europaeus</i> a la Erosión .....	62

## 1. Introducción

La invasión biológica, es causa fundamental de la pérdida de biodiversidad biológica, además de ir en detrimento de la producción de bienes y servicios ambientales, generando considerables impactos económicos y sociales (CBD, 2008). Las especies invasoras son aquellas que son introducidas fuera de su hábitat natural de manera deliberada o accidental, donde pueden establecerse, invadir y desplazar especies nativas.

La cuenca alta del río Bogotá cumple dos funciones básicas, es soporte biológico que provee condiciones para la existencia de diversos ecosistemas y es la base de diferentes actividades económicas. También alberga importantes recursos hidrológicos como ríos quebradas, embalses, lagunas, ciénagas, humedales, aguas subterráneas y 10 subcuencas hidrográficas que abastecen a más de 8 millones de habitantes, de los cuales un gran porcentaje dependen de actividades como extracción de materiales para construcción (arena, recebo, piedra, arcillas, etc.) silvicultura, ganadería, agricultura, floricultura, turismo, entre otras. Sin embargo todas estas actividades se ven amenazadas por la inestabilidad ecológica y rápido deterioro de la cuenca, poniendo en riesgo la existencia de las diferentes culturas que habitan la cuenca (Mendoza, 2000).

El paisaje heterogéneo de la cuenca permite la presencia de una gran diversidad de especies, cuenta con ecosistemas de alta montaña como paramos y subparamos, bosques alto andinos, subandinos y ecosistemas de piedemonte y vega de río. Esta gran diversidad biológica se ve también amenazada por el crecimiento poblacional desordenado y la sobreexplotación de los recursos (Mendoza, 2000).

Una de las especies invasoras mas notables en la cuenca alta del río Bogotá es el retamo espinoso, *Ulex europaeus*. Esta representa una amenaza importante para las especies nativas. Puede suprimir plantaciones de bosques y excluir animales

rumiantes, al igual que incrementar el riesgo de incendios, tanto en hábitats naturales como en áreas urbanas (Rees y Hill, 2001).

A pesar de la existencia de varias agencias nacionales como la Secretaría Distrital de Ambiente, el Instituto Alexander Von Humboldt, el Jardín Botánico José Celestino Mutis y la Universidad Nacional, que realizan diferentes estudios principalmente para el control y erradicación de esta especie, al igual que esfuerzos de restauración en áreas invadidas por el retamo espinoso, a nivel nacional poco se ha hecho en cuanto a la distribución actual de la especie en relación a los elementos biofísicos y antrópicos.

El propósito de esta investigación es explicar la ubicación del retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en la cuenca alta del río Bogotá con relación a los factores ambientales presentes que limitan o favorecen su desarrollo. La implementación de un modelo logístico permitirá predecir la distribución de los nichos apropiados para la especie, facilitando la identificación de las áreas más vulnerables a la presencia de la misma en el futuro. Esto permitirá evitar o mitigar el impacto de la invasión biológica del retamo espinoso sobre la diversidad local y la transformación de la estructura natural de los ecosistemas.

## **2. Antecedentes**

Debido a la preocupación de los países pertenecientes a la Comunidad Andina, por la creciente amenaza de la invasión biológica, en el año 2001, se realizó en Brasilia una Reunión de Trabajo sobre Especies Exóticas Invasoras (RTEEI). Con el fin de realizar un diagnóstico del tema en los países asistentes. Colombia aparece como el país con menos reportes de especies invasoras en los diferentes grupos taxonómicos (Ríos, 2005), probablemente debido a la falta de investigación del tema.

Los estudios realizados a nivel nacional acerca de las especies invasoras son pocos, la preocupación por el tema es muy reciente, sin embargo existen esfuerzos realizados por entidades tanto públicas como privadas, enfocadas principalmente al control de dichas especies y la restauración ecológica.

Recientemente el Jardín Botánico José Celestino Mutis publicó una *Guía técnica para la restauración ecológica de áreas afectadas por especies vegetales invasoras en el distrito capital* (Ríos, 2005), donde hace una descripción de los agentes invasores; retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Teline monspessulana*), estrategias de manejo y áreas afectadas por la invasión.

El Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, sacó un libro llamado *Estado de conocimiento de especies invasoras. Propuesta de lineamiento para el control de los impactos* (Gutiérrez, 2006), donde hace un listado de las especies invasoras presentes en Colombia, los causas y efectos de la invasión biológica y el marco legal que incluye este fenómeno.

La Secretaría Distrital de Ambiente, ha realizado dos estudios de restauración ecológica en la cuenca sub-cuenca media y alta del río Teusacá y en áreas rurales de Bogotá, donde la infestación del retamo espinoso es evidente, estos son: *Infestación de retamo espinoso (Ulex europaeus). Guía para la restauración de ecosistemas nativos en las áreas rurales de Santa Fé de Bogotá* (Castro, 2000) y *Diseño de experiencias piloto como estrategias de restauración ecológica en potreros abandonados e invadidos por retamo espinoso (Ulex europaeus), en la sub-cuenca media y alta del río Teusacá, cerros orientales de Bogotá* (Prado-Castillo y Montoya, sin año). En estos dos estudios los autores relatan la ecología de la especie; su morfología, ciclo de vida, reproducción y limitantes en función de su erradicación y futura restauración de áreas invadidas.

Más recientemente salieron dos publicaciones en un esfuerzo conjunto de la Secretaría Distrital de Ambiente, la Universidad Nacional y el Acueducto de Bogotá; *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino y*

*Restauración ecológica del bosque altoandino. Estudios diagnósticos y experimentales en los alrededores del embalse de Chisacá*, ambos en 2007, estas dos publicaciones enfocadas hacia el entendimiento de la biología de la especie con fines de restauración, haciendo énfasis en el comportamiento de los bancos de semillas, la incidencia de los tamaños de los parches y el efecto de la sombra sobre el desarrollo de la especie.

En la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales de la Universidad Javeriana, se destaca la investigación de Lozano (2007) donde realizó el modelamiento espacial de la probabilidad de invasión de palma africana (*Elaeis guineensis*) en bosques de galería del piedemonte llanero (Meta).

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

- Predecir la distribución de los nichos adecuados para la invasión biológica del retamo espinoso *Ulex europaeus* y su relación espacial con las áreas destinadas a la conservación, en la cuenca alta del río Bogotá.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Identificar las variables ambientales que favorecen o limitan la invasión biológica del retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en la cuenca alta del río Bogotá.
- Modelar la distribución de la probabilidad de ocurrencia para el retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en la cuenca alta del río Bogotá.
- Identificar las áreas más vulnerables a la invasión biológica del retamo espinoso en la cuenca alta del río Bogotá.
- Entender la relación espacial entre las áreas vulnerables a la invasión, con las áreas destinadas a la conservación, en la cuenca alta del río Bogotá.

## **4. Marco Teórico**

### **4.1 Transformación humana de los ecosistemas**

#### **4.1.1 Generalidades de la transformación**

El hombre es la mayor fuerza de cambio a nivel global, transformando el paisaje para proveerse de alimento, combustibles, fibras, agua y otros productos. La transformación del paisaje debe entenderse tanto en su dimensión espacial como temporal, es decir que la composición, estructura y función de los sistemas ecológicos son en parte, consecuencia de eventos históricos complejos de perturbación antropogénica (Dale *et al*, 2000).

Las primeras conversiones del paisaje se dieron en bosques templados y pastizales, En la actualidad la transformación mas rápida y drástica se observa en los bosques tropicales. Esta transformación del paisaje afecta los sistemas físicos, químicos y biológicos del planeta, influyendo directamente sobre su capacidad para producir los bienes y servicios ambientales. La calidad del agua y la fertilidad del suelo han sido severamente degradadas, los sistemas bióticos han sido fraccionados, disminuidos y puestos en peligro, gracias a la creciente demanda humana (Ojima *et al*, 1994).

La transformación del paisaje puede alterar la producción y la distribución de los recursos, afectando directamente la abundancia y distribución de las especies. Algunas especies en particular o redes de interacciones específicas son clave para el funcionamiento de los sistemas a gran escala, estas son consideradas especies focales. Los cambios en la abundancia y distribución de dichas especies generan diversos impactos ecológicos, afectando los procesos de competencia, mutualismo, dispersión, polinización o incluso enfermedad (Dale *et al*, 2000).

Los cambios en los patrones de uso del paisaje, no solo reducen la diversidad, sino también la reducen la capacidad de carga de los sistemas (Gaston *et al*, 2003).

El paisaje es transformado por la ocurrencia de disturbios, eventos que interrumpen el funcionamiento de los sistemas ecológicos, estos pueden ser de origen natural (tormentas, inundaciones, etc.) o antropogénicos (agricultura, asentamientos, vías, etc.). Los efectos de los disturbios dependen principalmente de la intensidad, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tamaño y forma del área afectada (Dale *et al*, 2000).

El disturbio con mayor incidencia sobre la transformación de los sistemas ecológicos es la agricultura. En el último siglo, la frontera agrícola se ha duplicado. Desde 1960 esta expansión ha sido de tan solo el 10%, sin embargo la producción de alimentos se ha duplicado gracias a la intensificación de la producción y a la implementación de sistemas de riego. A pesar de que el área agrícola per cápita haya disminuido a la mitad de 1900 a 1990, es evidente que a nivel mundial se está dando un fenómeno de colonización y deforestación con fines agrícolas (Etter *et al*, 2006).

Tan solo una fracción de la tierra en el mundo es apta para la agricultura y esta fracción está en su mayoría bajo explotación. Muchas de las tierras con gran potencial agrícola se encuentran bajo los bosques, lo cual genera preocupación en cuanto a la rápida tasa de pérdida de estos ecosistemas. La tala y quema, práctica agrícola de uso común, no sólo libera el dióxido de carbono de las plantas y del suelo, sino que también genera una pérdida significativa de hábitat (Tinker *et al*, 1997).

Los cultivos y pasturas en particular, son estructuralmente mucho más simples que los sistemas que reemplazan. Además gran parte de la productividad de estos sistemas naturales es apropiada directa o indirectamente por el hombre (Gaston *et al*, 2003).

La pérdida de hábitat es responsable por la pérdida del 36% de las especies, la caza es responsable por el 23% y la introducción de especies del 39%. La agricultura transforma drásticamente el paisaje, generando pérdida de hábitat y fomentando y favoreciendo la introducción de especies y la caza. Por estas razones la agricultura es considerada la principal causa de extinciones a nivel global (World Conservation and Monitoring Centre, 1992).

La transformación de los ecosistemas podría verse influenciada por el cambio climático; la tasa de conversión y el manejo de las áreas ya convertidas, influyen significativamente en el incremento de gases invernadero. Se espera que en las latitudes mas altas, el calentamiento global permita temporadas de cultivo y cosecha mas largas, expandiendo el “cinturón de granos” y la frontera de transformación ecosistémica. Por otro lado el incremento en la temperatura global podría favorecer procesos de desertificación en las latitudes mas bajas, transformando drásticamente los sistemas ecológicos del trópico (Ojima *et al*, 1994).

Por último, es importante enfatizar la importancia de los factores sociales, políticos y económicos en la transformación de los ecosistemas, ya que son estas las fuerzas que dictaminan el uso de la tierra. Se espera que los niveles de riqueza y tecnología sirvan para amortiguar el impacto del cambio climático y la transformación de ecosistemas sobre la producción de alimentos, sin embargo los países que gozan de dichas ventajas son pocos (Ojima *et al*, 1994).

#### **4.1.2 Procesos de transformación de los ecosistemas Andinos**

Colombia ha estado sujeta a la transformación de grandes áreas de sus ecosistemas naturales, en especial la región Andina. Los asentamientos en la cordillera central datan de más de 1500 años antes de la llegada de los españoles, evidenciando un largo proceso de transformación (Etter y Wyngaarden, 2000). Sin

embargo el uso de la tierra en épocas prehispánicas se limitaba a cultivos rotativos de tala y quema y en algunos casos cultivos permanentes, además la existencia de asentamientos urbanos era poco frecuente. La llegada de los españoles cambió completamente esta dinámica, principalmente por la introducción del ganado, la concentración de la población en áreas urbanas y la reducción de poblaciones nativas por enfermedades y exterminio. La ganadería se desarrolló principalmente en las tierras altas de los Andes (áreas con temporadas secas definidas), esta práctica basada en el uso del fuego para manejar los pastos, pudo haber llevado a la creación de nuevos paisajes abiertos (Etter y Wyngaarden, 2000).

Durante los siglos XVIII y XIX, el crecimiento demográfico exponencial resultó en altas densidades poblacionales y una alta transformación de los ecosistemas andinos. Durante el siglo XX, las altas tasas de crecimiento poblacional continuaron, resultando en colonización de nuevas áreas y usos extensivos de la tierra. En la actualidad, el conflicto armado ha forzado un patrón migratorio del campo a la ciudad, sin embargo no se ha evidenciado una recuperación de los sistemas naturales, por el contrario, ha incrementado el pastoreo; homogenizando el paisaje, aumentando la erosión y afectando negativamente la regulación hidrológica (Etter y Wyngaarden, 2000).

Las diferentes actividades agrícolas, han reducido, fragmentado y en algunos casos, erradicado los ecosistemas naturales. Estas actividades alteran el paisaje a nivel estructural y funcional, al geometrizar el territorio y cambiar los patrones espaciales de la vegetación (IDEADE 1992 en Etter y Villa, 2000).

#### **4.1.3 Procesos de transformación del paisaje en la cuenca alta del río Bogotá**

A pesar de la evidencia de asentamientos precolombinos, fue después de la conquista europea que el paisaje de la cuenca fue seriamente afectado.

Inicialmente por la tala masiva de árboles nativos con fines extractivos (taninos, leña y construcción) y como “castigo” a las comunidades indígenas que veneraban las especies nativas como el Nogal (Barrera *et al*, 2002). Posteriormente a principios del siglo XX se dio una introducción masiva de especies maderables exóticas como el eucalipto y otras coníferas, sustituyendo el bosque nativo por dichas plantaciones (DAMA 2002 en Ríos, 2005).

El cambio del uso del suelo en algunas áreas, de áreas protegidas para la conservación de la vegetación nativa a áreas de producción, junto con la apertura de diversas canteras a cielo abierto generó una drástica fragmentación del paisaje.

En la actualidad, esta área sufre una fuerte presión de ocupación y un proceso degradativo casi irreversible (Ríos, 2005). Como resultado de procesos y dinámicas agrícolas y urbanísticas, la cuenca alta del río Bogotá es un paisaje seriamente alterado y heterogéneo “Los cerros orientales de Bogotá actualmente se encuentran colonizados por potreros con especies invasoras de gramíneas y retamo espinoso donde existieron bosques andinos y páramos. Nuestro conocimiento de la ecología de estos ecosistemas y la forma como estas especies invasoras lo afectan es limitado” (Prado-Castillo y Montoya sin fecha).

#### **4.2 Invasión biológica de especies vegetales**

Durante los últimos siglos la movilidad de especies tanto animales como vegetales, fuera de sus rangos de distribución natural se ha agudizado. Sin embargo, a pesar de que la introducción es frecuente, la tasa de naturalización de especies exóticas es baja, es decir especies que puedan establecer poblaciones persistentes en el tiempo sin ayuda del hombre.

Una vez las especies se naturalizan, estas pueden alterar el funcionamiento ecológico del sistema hospedero, convirtiéndose en especies invasoras. Las poblaciones de especies invasoras pueden avanzar de manera inmediata o entrar en latencia, periodo durante el cual esperan por meses o incluso años a que se

den cambios en las poblaciones (tamaño mínimo poblacional) o en el ecosistema, que generen condiciones óptimas para la invasión (Sánchez-Tapia y Vargas, 2007).

Este proceso de invasión, que va desde la introducción hasta la invasión, pasando por la naturalización funciona como un filtro, ya que de las especies que se introducen en un determinado ecosistema, solo unas pocas logran naturalizarse y de estas pocas, solo un pequeño porcentaje de especies se convierten en invasoras. Un estudio realizado en Irlanda demuestra que de un 100% de especies exóticas, 52% no pueden establecerse, es decir son especies “casuales”, el 48% restante logra establecerse, de este 48% el 81% de especies se naturalizan y tan solo el 19% de las especies introducidas son de carácter invasivo, en resumen, de 716 especies no nativas, solo 65 de ellas se pueden considerar invasivas (Milbau y Scout, 2008).

Indudablemente existen factores que favorecen la capacidad de invasión de una especie, que la hacen más o menos invasiva. La transición de una especie, para pasar de estatus *casual a naturalizada* puede verse facilitada por factores como crecimiento clonal, alto contenido de humedad, bajos niveles de nitrógeno y que haya sido introducida tiempo atrás. Los factores que facilitan el cambio de estatus de *naturalizada a invasora*; si la especie fue introducida con propósitos ornamentales, si cuenta con flores hermafroditas, si no es polinizada por animales, si presenta comportamiento invasivo en otras partes, si prefiere hábitats húmedos, entre otros (Milbau y Scout, 2008).

En general, cada evento de invasión cuenta con una dinámica particular, producto de la combinación entre las características del agente invasor y del ecosistema hospedero, de las respuestas de ambos al entrar en contacto, junto con una serie de eventos estocásticos (Sánchez-Tapia y Vargas, 2007).

### **4.3 Transformación de los ecosistemas y la invasión biológica de especies**

La estructura del paisaje puede afectar una o todas las etapas de la invasión biológica; introducción, colonización, establecimiento y dispersión. Aunque la introducción de especies depende principalmente de la intervención humana para sobrepasar barreras geográficas, las diferentes actividades humanas alteran la estructura del paisaje, facilitando la introducción.

Los diferentes organismos presentes en un determinado sistema, responden al tamaño, forma y patrón de los hábitats distribuidos en el paisaje. Los patrones de los asentamientos humanos y el uso del suelo, fragmentan el paisaje y alteran los patrones de cobertura. La reducción del tamaño de los parches de hábitat o el incremento de la distancia entre parches, puede reducir o eliminar poblaciones (Dale *et al*, 2000).

El establecimiento de las especies depende de un crecimiento poblacional positivo que a su vez podría verse influenciados por la fragmentación, al aumentar la competencia, la predación, el parasitismo o el efecto de borde. Por último, los vectores de dispersión de los organismos se ven afectados por el arreglo espacial de los recursos o de los hábitats en el paisaje (With, 2004).

Existen niveles críticos de transformación que determinan la ocurrencia de la invasión. Estos niveles críticos dependen de los patrones espaciales de perturbación y de la capacidad de dispersión de las especies. La importancia de la estructura del paisaje disminuye al aumentar el rango de dispersión de las especies. Las especies exóticas no solo pueden movilizarse a lo largo de hábitats perturbados, también pueden infiltrarse en hábitats nativos a través de los bordes (With, 2002).

Los ecosistemas transformados tienden a ser más vulnerables a la invasión biológica. La vulnerabilidad entendida como la propensión de una comunidad a ser invadida, en algunos textos es llamada “invasibilidad” (en inglés; invasibility), esta

se puede dar por un número excesivo de invasiones o por susceptibilidad intrínseca a la invasión, es decir que el grado de “invasibilidad” determina la probabilidad de supervivencia y establecimiento de la especie invasora (Richardson y Pys̆ek, 2006).

Las especies invasoras deben contar con ciertos atributos o mecanismos que aumentan su capacidad de invasión, pero también deben darse las condiciones geográficas apropiadas para asegurar el éxito de la invasión (Rejmanek y Richardson, 1996). Existen también ciertas características ecológicas que pueden potencializar los atributos de las especies invasoras, como el aislamiento geográfico e histórico, la baja diversidad de especies nativas, altos niveles de perturbación (tanto naturales como antropogénicos) o la ausencia de competidores, predadores, parásitos, enfermedades, etc. (Zabaleta, 2007).

La invasibilidad de las comunidades depende también de la distribución de los hábitats y los recursos en el paisaje. Las comunidades cuyos hábitats y recursos están “hacinados” o concentrados, pueden ser más sensibles a la perturbación local, tienen un umbral crítico de biodiversidad mayor, es decir que necesitan una riqueza superior de especies para mantener resiliencia (With, 2002).

#### **4.4 Ecología del paisaje y la invasión biológica**

El paisaje se define como un área espacialmente heterogénea analizable a cualquier escala relativa a los procesos ecológicos u organismos (objetos de la investigación), lo que permite estudiar las consecuencias ecológicas de los patrones espaciales (With, 2002).

Para entender el fenómeno de la invasión biológica desde la ecología del paisaje, es necesario entender como la distribución espacial de los recursos, poblaciones o hábitats a cualquier escala, afecta los diferentes estados de invasión (With, 2002), ya que la estructura y composición del paisaje al igual que los cambios que se den

en el, influyen en la dinámica, distribución y abundancia de las especies (Morris, 1995).

Aunque se sabe que la pérdida de hábitat, la fragmentación y la invasión biológica de especies amenazan conjuntamente la biodiversidad, es necesario entender cómo la alteración estructural del paisaje podría promover o aumentar la probabilidad de la invasión biológica (With, 2004).

Evaluar la distribución espacial de los organismos en el paisaje es clave para identificar los procesos ecológicos que generan ciertos patrones de distribución en paisajes heterogéneos, permitiendo cuantificar y comparar los patrones espaciales del paisaje (Kraft *et al*, 2002), algunas de estas características son determinantes en la dinámica poblacional de las especies (Dunning *et al*, 1992).

#### **4.5 Biogeografía**

Desde las primeras exploraciones humanas, las barreras biogeográficas que previamente mantenían en aislamiento a las biotas, han sido alteradas. Estos intercambios, relativamente recientes tienen consecuencias sobre los procesos evolutivos, las dinámicas poblacionales y ecosistémicas, dando como resultado serias perturbaciones ecológicas. (Money y Cleland, 2001, Vitousek *et al*, 1996).

La distribución de las especies y su rango geográfico pueden ser explicadas mediante la teoría de *nicho ecológico multidimensional* de Hutchinson. Este plantea que en un determinado momento, todas las especies se ven limitadas por uno o más factores ambientales. El nicho, puede entenderse como la combinación de las variables que permiten a los individuos sobrevivir y reproducirse y a las poblaciones, mantenerse. El rango geográfico de las especies es el reflejo espacial del nicho, más las características geográficas (barreras) y el potencial de colonización de la especie. Si las especies no se vieran limitadas por su capacidad intrínseca para colonizar o por barreras biogeográficas, sería de esperarse que

estas ocurrieran donde sea que las condiciones ambientales fuesen aptas (Lomolino *et al*, 2006).

La teoría de nicho, define el concepto de espacio ambiental, el cual, a diferencia del espacio geográfico (que es simplemente la distribución de una especie como la vemos en un mapa), como un espacio conceptual definido por las variables ambientales a las cuales el organismo responde. Visualizar la distribución de las especies, tanto en espacio geográfico como ambiental, permite definir conceptos básicos para el modelamiento de la distribución de especies. Conceptos como; *Nicho ocupado*: Parte del espacio ambiental ocupado por la especie. Comprende los impedimentos espaciales, de dispersión limitada y las interacciones con otros organismos que inciden en la distribución de las especies. *Nicho fundamental*: Rango de condiciones abióticas dentro de las que la especie es viable. *Distribución potencial*: Las condiciones ambientales encapsuladas dentro del nicho fundamental, plasmadas en el espacio geográfico (Pearson, 2007).

El aislamiento de las biotas hace que las especies no generen mecanismos de defensa contra otras especies, con las cuales de manera natural no interactuarían, lo cual vuelve a los sistemas naturales susceptibles a la invasión biológica.

Sin embargo, la invasión no es un evento sencillo ni común. Según Lomolino *et al* 2006, las biotas continentales son relativamente resistentes a la invasión biológica. Numerosas especies animales y vegetales del viejo continente, han sido ampliamente distribuidas en América durante los últimos cuatro siglos y gozan de una abundancia local. A pesar del notable éxito de estas especies, estas representan tan solo una pequeña fracción de las especies que han sido intencional o accidentalmente introducidas. La gran mayoría de especies invasoras se han extinto y muchas otras se encuentran confinadas al lugar de introducción.

Las especies invasoras pueden evolucionar en cortos periodos de tiempo, en respuesta a la interacción con las especies nativas y con su nuevo ambiente,

generando un comportamiento flexible, que junto con interacciones mutualistas facilitan las dinámicas de invasión (Money y Cleland, 2001). Estos procesos evolutivos generan variaciones en las especies, tanto en su fenotipo como en su biología. El conocimiento de estas “variaciones ecotípicas” es esencial para el manejo y control de las especies invasoras (Millener, 1962), ya que la distribución, el crecimiento, las tasas de supervivencia, la reproducción, etc., tienden a variar con respecto al área geográfica que ocupen, haciendo que los esfuerzos de manejo de las especies invasoras sean diferentes para cada lugar.

#### **4.6 Ecología de poblaciones invasoras**

Es importante entender las características biológicas y poblacionales que hacen que una especie sea una “buena invasora”, con el fin de identificar las especies con mayor capacidad invasiva, previniendo su introducción inicial (Goodwin *et al*, 1999). La ecología de poblaciones es entonces una útil herramienta para entender y manejar la invasión biológica de especies, permitiendo identificar momentos vulnerables en la vida de la especie, durante los cuales su manejo sea más efectivo.

Las especies invasoras como todas las especies tienen debilidades. Los recursos son aquellos presentes en niveles inferiores a los requeridos para que la especie alcance su desarrollo normal, restringiéndola a un estado menor al óptimo dado por las condiciones ambientales del lugar. La teoría del factor limitante de Leibig, planteada en 1930 menciona que el desarrollo de una especie llega hasta el punto permitido por la disponibilidad del factor que se halla en menor proporción (DAMA 2000 en Ríos, 2005). El conocimiento de estos factores limitantes permite entender la distribución de las especies invasoras e identificar futuras áreas de invasión ya que estos factores están estrechamente ligados con la ecología de la especie.

Las especies vegetales invasoras cuentan con ciertas estrategias poblacionales para la colonización de nuevos hábitats; autofertilización, múltiples estrategias reproductivas (reproducción vegetativa y por semilla), o la presencia de frutos con múltiples semillas así como plasticidad fenotípica, la cual facilita la tolerancia a nuevas condiciones ambientales, también denominado “genotipo de propósito general” (Sakai *et al*, 2001). Otra estrategia de gran utilidad es la formación de bancos de semillas persistentes, cuya viabilidad puede ser de décadas o incluso siglos, estas semillas cumplen diferentes tareas; reservorio de propágulos, reducción de la probabilidad de extinciones poblacionales, contienen alelos que pueden cambiar la tasa de evolución o la estructura genética, favoreciendo la adaptabilidad y permitiendo la especialización en nuevos ambientes (Zabaleta, 2007).

Entender el comportamiento poblacional de las especies no nativas al igual que las nativas (invasoras e invadidas), ayuda a entender la transición de una especie de casual a invasora, o de una especie común a rara o incluso extinta, este entendimiento generará mejores herramientas y estrategias de control y erradicación de especies problemáticas.

#### **4.7 Ecología de la conservación y la invasión biológica de especies**

El estudio de especies invasoras ha cobrado gran relevancia para disciplinas aplicadas a la biología de la conservación, ya que a pesar de que las invasiones biológicas son un fenómeno natural, en la actualidad se han convertido en una amenaza muy grave para la conservación de hábitats, poblaciones, comunidades y especies (Gutiérrez, 2006). La presencia de especies exóticas, particularmente exitosas y agresivas, causa la extinción de especies, llegando a dominar grandes áreas, reemplazando las comunidades autóctonas e interfiriendo con la dinámica de los sistemas naturales (Crooks y Soule 1997 y Ruiz 1997 en Gutiérrez, 2006). Las especies invasoras no solo reducen las poblaciones nativas o alteran las

relaciones de competencia, también generan extinciones locales, reales y ecológicas, inhibiendo el papel de ciertas especies clave (Mooney y Cleland, 2001).

El grado de diversidad de la comunidad receptora, juega un papel de restricción a la invasión, imponiendo limitaciones; al aumentar la competencia y disminuir el número de nichos vacíos, esta dinámica es conocida como “resistencia biótica” y disminuye la invasibilidad de los ecosistemas (Ríos, 2005).

Los modelos de distribución de especies tienen una gran aplicabilidad para la conservación ya que permiten señalar áreas importantes para la conservación, áreas propensas a la invasión biológica, áreas aptas para la reintroducción de especies nativas o incluso la futura distribución de las especies bajo un eventual cambio climático (Pearson, 2007).

El concepto *Principio de Precaución* es ampliamente utilizado en la ecología de la conservación, este promueve acciones para prevenir riesgos de perjuicios serios o irreversibles al medio ambiente. Consecuentemente, el principio provee un importante fundamento político para anticipar, prevenir y mitigar amenazas al ambiente (UICN, 2005). Una de las mayores amenazas a la biodiversidad, es la invasión biológica de especies, la cual puede causar daños irreversibles como la extinción de especies nativas, por esta razón, el *Principio de Precaución* es aplicable al estudio de las especies invasoras.

#### **4.8 Retamo espinoso (*Ulex europaeus*)**

Esta especie pertenece a la familia Leguminosae, considerada como uno de los taxa mas ampliamente diseminados a nuevas regiones por la actividad humana (Parker *et al*, 2006). La especie de amplia distribución (ver figura 1), originaria del mediterráneo europeo, es un arbusto espinoso (carece de hojas, todas son

reemplazadas por espinas) que invade suelos mal drenados (no necesariamente higromórficos), muy alterados y con poca estructura, conforma densas y extensas masas espinosas, “ahogando” toda otra vegetación y dificultando cualquier uso del suelo, exceptuando la construcción (Castro y Vanegas, 2000).



Figura 1. Distribución de *Ulex europaeus* en el mundo.

Según Vargas 2007, la especie modifica la estructura del suelo gracias a su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico. Cuenta con raíces con altísima capacidad de penetración y rebrote, lo cual la hace prácticamente inmune al fuego y al desbroce (tala). El retamo espinoso es una especie ruderal y antropófica (su nicho se expande con la actividad humana) y pirófila (resistente al fuego y este favorece su expansión). Los matorrales densos de *Ulex*, acumulan grandes cantidades de necromasa en pie de poca humedad gracias a su condición heliófita, ya que las ramas superiores generan sombra sobre las inferiores, secándolas y matándolas. Esto favorece la ocurrencia de incendios que interrumpen los procesos sucesionales.

Es considerada una especie estrictamente heliófita que no tolera el sombreado en lo más mínimo. El desarrollo de plántulas en condiciones de sombra total, reduce la supervivencia, pero bajo condiciones de poca luz o fotoperiodos muy cortos, las

plántulas tienden a generar menos cantidad de espinas además de inhibir la formación y maduración de las flores (Bieniek y Millington, 1968).

En cuanto a la pendiente, la necesidad de esta especie por suelos mal drenados, hace que compita mejor en pendientes leves de drenaje lento, haciéndola menos eficiente en pendientes pronunciadas, además tiene problemas al competir con gramíneas como el quicuyo.

El retamo espinoso puede reproducirse tanto de manera sexual como asexual, sin embargo se reproduce mas efectivamente por rizomas, generando una expansión continua, dependiente de masas preexistentes (Castro y Vanegas, 2000).

En su sitio de origen, el retamo espinoso crece de 1-2 metros de alto y favorece la conservación de especies nativas, ya que estabiliza el suelo y favorece la sucesión vegetal.

En las áreas que invade, la especie persiste principalmente gracias a su alta capacidad de regeneración y la producción de gran cantidad de semillas, las cuales conforman abundantes bancos que se manifiestan de manera masiva después de la ocurrencia del fuego (Zabaleta, 2007). Estos bancos de semillas determinan los patrones espaciales y temporales de las plántulas, en el caso del retamo espinoso, la mayor cantidad de las semillas se encuentran cerca de la planta parental, es decir el número de propágulos disminuye al aumentar la distancia (Rees y Hill, 2001). Además de la formación de bancos de semillas persistentes, la alta producción de flores, frutos y semillas durante todo el año le ofrece a esta especie una importante ventaja competitiva (Vargas, 2007).

Su ventaja competitiva en Colombia está limitada a tierras bajas de suelos ricos, ya que el frío (las heladas) y la acidez del suelo del páramo no le favorecen, sin embargo Ríos 2005, menciona el establecimiento de la especie en ecosistemas de alta montaña en la Cordillera Oriental de Bogotá, como bosque andino, altoandino y páramo (3400 – 3500 m.s.n.m).

A nivel nacional, la distribución de esta especie esta limitada a la región andina (entre los 2500 y 3200msnm, concentrándose en los 2700msnm), principalmente

en los departamentos de Cundinamarca y Antioquia donde es cada vez mas frecuente encontrarla en potreros abandonados, laderas erosionadas, bordes de quebradas y caminos, en paisajes montañosos transformados y frecuentados por el fuego (Vargas, 2007).

#### **4.9 Impactos causados por la invasión biológica de especies vegetales**

La introducción de especies genera diversos impactos sobre los ecosistemas invadidos, puede generar una disminución en la diversidad local o incluso incrementar la frecuencia de incendios, esto a través de diferentes mecanismos o procesos como; competencia, alelopatía o la producción de biomasa inflamable. Es importante entender estos procesos y mecanismos de invasión, para así poder saber porque algunas especies invasoras generan mayores impactos sobre ciertos ecosistemas que sobre otros (Levine *et al*, 2003).

Los procesos de regulación trófica también son amenazados por la introducción de especies exóticas, ya que al entrar nuevas especies vegetales a la cadena trófica, estas se convierten en un nuevo recurso para la biota nativa, favoreciendo predadores y herbívoros, generando un incremento en la presión sobre recursos nativos, al aumentar la herbivoría la dispersión de semillas decrece y el equilibrio trófico se ve amenazado (Sánchez-Tapia y Vargas, 2007).

Los procesos ecosistémicos también pueden ser alterados por la introducción de especies exóticas. Especies fijadoras de nitrógeno pueden alterar el ciclaje natural de nutrientes, esta nueva oferta de elementos químicos podría a su vez facilitar la invasión por parte de nuevas especies.

Los procesos hidrológicos son también vulnerables a la invasión de especies, ya que plantas no nativas alteran las tasas de evapotranspiración (al retener mas o menos agua) y también los regímenes de esorrentía, repercutiendo en el balance hídrico general.

El régimen natural del fuego puede ser alterado por la presencia de especies no nativas, ya sea por la acumulación de necromasa seca o por la producción de aceites inflamables, diferentes especies pueden no solo aumentar las probabilidades de ocurrencia de incendios, sino también su intensidad (Levine *et al*, 2003).

La introducción de especies genera considerables impactos sobre los procesos evolutivos a través de mecanismos como; exclusión competitiva, desplazamiento de nichos, hibridización, predación y extinción. Los agentes invasores evolucionan en respuesta a la interacción con las especies nativas y con su nuevo ambiente, por otro lado, las especies nativas también pueden evolucionar y cambiar su comportamiento, incluso el mismo ambiente abiótico puede presentar cambios como respuesta a la invasión. Este conjunto de interacciones resultan en nuevas taxa, novedosos mutualismos, extinciones y diferentes cambios evolutivos (Mooney y Cleland, 2001).

Consecuentemente, diferentes sectores económicos se ven seriamente comprometidos. La agricultura (incluyendo sistemas agroforestales, silvopastoriles y horticultura) es el sector mas afectado y de mayor importancia para la supervivencia humana, la seguridad alimentaria y económica de millones de personas (McNeely *et al*, 2001). Si la presencia de especies no nativas altera el ciclaje natural de nutrientes, el ciclo hidrológico y el régimen del fuego, es posible que se presenten fenómenos de pérdida de fertilidad, sequías o inundaciones e incendios forestales que no solo generan millonarias pérdidas económicas sino también desplazamiento y escasez, alimentando el círculo vicioso entre degradación ambiental y pobreza.

## **4.10 Modelamiento de la distribución de especies**

### **4.10.1 Generalidades del modelamiento**

Se sabe poco acerca de las tasas, patrones espaciales y factores determinantes de la invasión biológica (Macdonald, 1993). La magnitud y naturaleza de los impactos causados por la invasión de especies introducidas sobre los sistemas naturales, hacen necesario el desarrollo de herramientas que permitan predecir futuras invasiones, como lo son los modelos de invasión (GARP, MAXENT, BIOCLIM, DOMAIN, GAM, GLM, ENFA). Estos modelos utilizan información de la especie y de los atributos ambientales determinantes para el esparcimiento invasivo, para predecir tasas y patrones de invasión (Higgins *et al*, 1996).

En 2007 Richard Pearson publicó una guía titulada *Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners*, en la cual propone diferentes metodologías para el modelamiento de la distribución de especies, en este documento también explica el soporte teórico de dicho modelamiento y los alcances del mismo, la siguiente información proviene de esta guía. Estos modelos utilizan la asociación entre las variables ambientales y la ocurrencia observada de la especie, para identificar condiciones ambientales dentro de las cuales se puedan mantener poblaciones saludables. La distribución espacial de los ambientes aptos para las especies puede ser localizada a lo largo del área de estudio. La premisa de este acercamiento es que la distribución observada de las especies, brinda información útil, en cuanto a los requerimientos de las mismas.

Esta información entra en un algoritmo que busca identificar las condiciones ambientales asociadas con la ocurrencia de la especie, estos algoritmos deben tener la capacidad de integrar más de dos variables ambientales, ya que en la

realidad, las especies responden a múltiples factores, es necesario que los algoritmos incorporen también, interacciones entre variables (Elith *et al*, 2006).

Este tipo de modelamiento ha sido acotado de diversas maneras;”*distribución de especies*”, “*nicho ecológico*”, “*nicho ambiental*”, “*aptitud de hábitat*”, “*sobre bioclimático*”. El termino más ampliamente utilizado es “*modelamiento de la distribución de especies*”, sin embargo lo que se está modelando es la distribución de los ambientes óptimos o adecuados (nichos), no la distribución de las especies como tal.

El modelamiento de la distribución de especies permite modelar la “distribución actual o potencial” de las especies. Si lo que se busca es localizar áreas de alta prioridad para la conservación, entonces lo que se debe hacer, es modelar la distribución actual, ya que se le dará menor prioridad a la conservación de áreas donde el ambiente es apropiado para la especie, pero ésta no está presente. Por otro lado si lo que se busca es identificar áreas aptas para la reintroducción, el modelamiento de la distribución potencial es lo correcto.

Los modelos de solo presencia buscan evitar falsas ausencias y maximizar el número de presencias observadas correctamente predichas. Disminuyendo la probabilidad de registrar ausencias, en ambientes adecuados (Pearson *et al.*, 2006).

Es importante resaltar que los modelos de distribución de especies no pueden predecir la distribución actual ni potencial en su totalidad. El modelo puede; identificar áreas alrededor de los puntos de ocupación que se espera, sean ocupados, puntos de distribución actual desconocidos y/o puntos de distribución potencial no ocupados aún. Por último es necesario entender que un modelo y sus predicciones son solo tan buenos como los datos que se utilizan en el.

#### 4.10.2 Modelo de Distribución de Especies MAXENT 3.2.1 ®

Maxent es un método multipropósito que predice o infiere desde una información incompleta. Estima la probabilidad de distribución de máxima entropía (más cercana a la uniformidad).

El modelo genera la distribución de la probabilidad de los píxeles en una cuadrícula. Comienza desde una distribución uniforme, ajustando los datos cada vez más. El modelo opera con “ganancias” (*Ganancia*: Probabilidad logarítmica promedio de presencia menos una constante que hace que la distribución uniforme tenga cero ganancia), las cuales indican la concentración del modelo alrededor de las muestras de presencia y si dicha concentración es mayor que en un píxel aleatorio (Phillips *et al*, 2006).

Este modelo ofrece las siguientes ventajas: (1) Requiere únicamente registros de presencia. (2) Puede utilizar variables continuas y categóricas e incorpora interacciones entre diferentes variables. (3) La información generada es continua lo cual permite distinguir entre predicciones modeladas para diferentes áreas. (4) Maxent también es aplicable a registros de presencia/ausencia. (5) Es un modelo generativo, no discriminativo lo cual es ventajoso cuando los datos son limitados. (6) El modelamiento de máxima entropía está en constante actualización. (7) Es aplicable a múltiples escalas y campos. (8) El *sobre – ajuste* puede evitarse utilizando la herramienta de regularización.

Sin embargo, Maxent presenta limitaciones como: (1) No es un método estadístico tan maduro como otros (GLM o GAM), por lo tanto existen menos guías de uso y menos métodos para evaluar el error de las predicciones. (2) El uso de regularización requiere estudios más profundos. (3) Utiliza un modelo exponencial de probabilidad, lo cual dificulta la extrapolación a otras áreas o cambios climáticos. Las ventajas y desventajas mencionadas surgieron de un estudio

realizado por Phillips et al 2006, donde compararon las predicciones de Maxent 3.2.1 ® con las de GARP (*Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction*), en un estudio a escala continental de dos especies de perezosos.

#### 4.10.3 Regresión Logística

La regresión logística es una herramienta estadística que goza de una gran capacidad de análisis de datos en la investigación biológica. Tiene la capacidad de modelar la influencia de uno o diversos factores sobre la probabilidad de ocurrencia de un determinado suceso, generalmente la ocurrencia es del orden dicotómico (presencia/ausencia) (Molinero 2001).

En la regresión lineal, la variable respuesta solo presenta dos valores. Si clasificamos el valor de la variable respuesta como 0 cuando no se presenta el suceso (ausencia de la especie) y con el valor 1 cuando sí está presente, y buscamos cuantificar la posible relación entre la presencia de la especie y, por ejemplo, la temperatura media anual como un posible factor que incide en el desarrollo de la especie, podríamos pensar en utilizar la regresión lineal de la siguiente manera:  $Presencia = a + b * [temperatura\ media\ anual]$ , y así utilizar la ley de mínimos cuadrados para determinar los valores de a y b.

El problema con este planteamiento es que al calcular la función obtenida para los diferentes valores de temperatura, se obtendrían datos diferentes a 0 y 1, los cuales son los únicos resultados posibles; presencia o ausencia (Molinero 2001).

Para solucionar esto, implementamos como variable dependiente, la probabilidad  $p$  de que la especie ocurra, construyendo la siguiente función:  $\ln ( p / 1-p )$ , como esta variable si puede tomar cualquier valor, podemos construir una ecuación de regresión tradicional:  $\ln ( p / 1-p ) = a + b * [temperatura\ media\ anual]$ , que se convierte en:  $Presencia = 1 / 1+e ^ (-a -b * [temperatura\ media\ anual])$ . Esta ecuación se conoce como modelo logístico donde el número de factores puede ser

mas de uno, el exponente  $(-a - b * [temperatura\ media\ anual])$ , podría incluir varios factores, como por ejemplo;  $b1.temperatura\ media\ anual + b2.tipo\ de\ suelo + b3.cobertura$  (Molinero 2001).

#### **4.10.4 Sistema de Información Geográfica (SIG)**

Un modelo de distribución actual permite identificar áreas apropiadas o aptas para la especie, pero que no están ocupadas por la misma (Pearson 2007). Estas áreas se interpretarán como de potencial invasión y se ubicarán geográficamente en el espacio utilizando herramientas de SIG, generando un mapa de áreas de invasión potencial de la especie.

SIG es una herramienta esencial para el modelamiento de la distribución de las especies. Idealmente, la información biológica y ambiental se guarda, formatea y observa en este formato. El sistema SIG permite cambiar los sistemas de referencia geográfica, de manera que toda la información, tanto ambiental como biológica este referenciada en un mismo sistema de coordenadas, para poder extrapolar la información a una grilla (Peterson *et al*, 2002). Ubicar todos los datos en grillas de formato *raster* asegura la disponibilidad de la información ambiental para cada celda donde se haya registrado la especie. Estas celdas, que contienen tanto información ambiental como biológica son utilizadas para la construcción del modelo (Pearson, 2007).

## **5. Materiales y métodos**

### **5.1 Área de estudio**

#### **5.1.1 Cuenca alta del río Bogotá**

La Cuenca Alta del río Bogotá es el área objeto del presente estudio. Este territorio alberga mas de ocho millones de habitantes y soporta múltiples actividades extractivas y agrícolas, además de brindar condiciones para la existencia de una diversidad biológica importante. Esta región de 4219 km<sup>2</sup> de extensión contiene 27 municipios y se asienta en la Cordillera Oriental. La cuenca es recorrida en su parte central por el río Bogotá, abrazada por dos cordones montañosos en forma de paréntesis que se abren en el Páramo de Sumapaz (Mendoza 2000) (Ver figura 2).

En el fondo de la cuenca se encuentra la Sabana de Bogotá, esta ocupa el 30% de la misma. Presenta lomas, colinas y pendientes suaves, lo cual, junto con la calidad de los suelos y la oferta hídrica, la han convertido en tierra destinada para la agricultura y el asentamiento humano (Mendoza 2000).

Según la CAR 2001, el 60.93% de la cuenca está conformada por tierras intervenidas como cultivos permanentes, cultivos temporales y pastos. La cobertura vegetal natural es de tan solo el 10%, la superficie construida es el 6.29% de la cuenca, el 0.71% corresponde a invernaderos y 0.94% a canteras. Además, más de la mitad de la cuenca presenta procesos erosivos, principalmente erosión hídrica, con el agravante del continuo desarrollo socioeconómico.

El río Bogotá es la corriente principal de la cuenca, tiene 255 km. de longitud, de los cuales 185 discurren entre su nacimiento y el Salto de Tequendama (Mendoza, 2000). Además del río Bogotá, la cuenca cuenta con un sistema de embales

(Sisga, Neusa, Tominé, San Rafael y Muña) que regula y controla inundaciones (CAR 2001).

La cuenca presenta tres unidades geomorfológicas; planicie, piedemonte y montaña, las cuales presentan en conjunto cinco geformas; sabana, piedemonte, laderas, subpáramo y páramo. Conformados principalmente por ecosistemas de bosque alto andino y paramos, ecosistemas claves para la biodiversidad andina (Mendoza 2000).



Figura 2. Ubicación del área de estudio

La presencia de cinco valles interandinos, considerables recursos hídricos, un clima tropical de altura (frío por altura e isotérmico) que va desde frío seco hasta muy frío muy húmedo, una altísima diversidad edáfica, la presencia marcada de una temporada seca y otra húmeda, la influencia de un terreno abrupto y la formación de vertientes que distribuyen la precipitación, dan como resultado un paisaje ecológicamente heterogéneo. Si a esto sumamos la creciente presión

antrópica y la transformación de los ecosistemas nativos, obtendremos un área óptima para el estudio de especies invasoras (Mendoza 2000).

Es importante resaltar los impactos que genera la presencia de una ciudad como Bogotá en la cuenca alta del río Bogotá. Además de demandar una gran cantidad de recursos, la ciudad crece desmesuradamente, lesionando ecosistemas circundantes y generando más de 5000 toneladas de desperdicios diarios. Particularmente, Bogotá creció a expensas de la sabana, un ecosistema de carácter estratégico, con una considerable aptitud agrícola, ganadera y forestal, ahora completamente transformada. También invadió los cerros orientales con fines urbanísticos y extractivos. La infraestructura vial nacional atraviesa toda la cuenca y toma como eje central a Bogotá, la constante necesidad de ampliar la malla vial para comunicar el comercio nacional genera serias perturbaciones en los diferentes ecosistemas de la cuenca (Mendoza, 2000).

La cuenca cuenta con un caudal medio anual de 52.56 m<sup>3</sup>/s y una demanda para consumo humano de 8.11m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, la cuenca cuenta con un alto número de vertimientos municipales (483), agropecuarios (672) e industriales (2822). Los cuales aportan grandes cantidades de materia orgánica y metales pesados, dificultando y encareciendo el acceso a agua potable (CAR, 2001).

En conclusión la cuenca alta del río Bogotá es un territorio ampliamente perturbado, amenazado por su propia riqueza ecológica y por la presencia de la ciudad de Bogotá, sin dejar de ser un mosaico de ecosistemas estratégicos andinos cuya conservación es esencial para la persistencia de la diversidad biológica local.

## 5.2. Procedimiento metodológico

El estudio comprende cuatro fases metodológicas. El siguiente diagrama muestra las diferentes actividades y productos de cada fase (Figura 3).

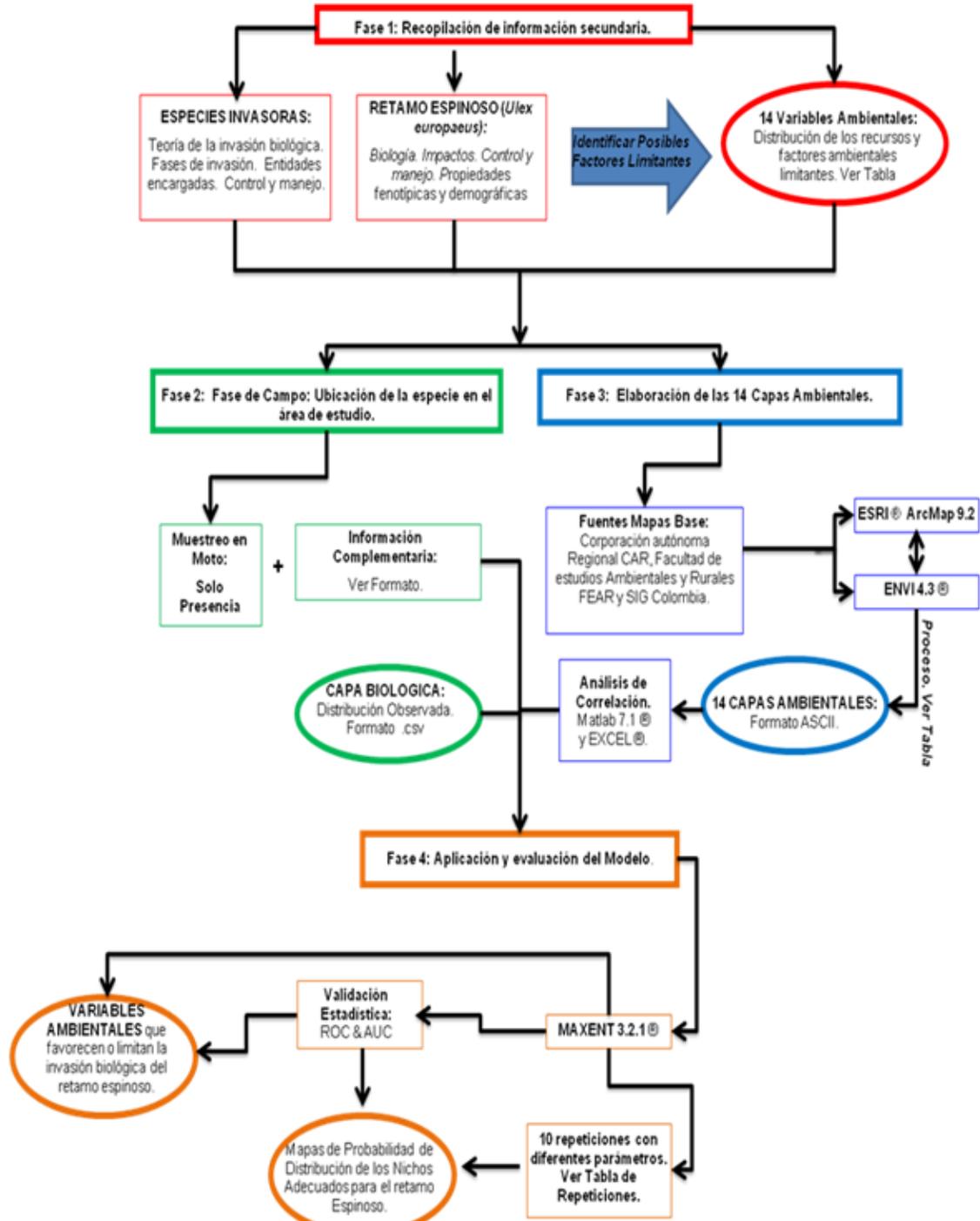


Figura 3. Diagrama metodológico.

### 5.2.1 Fase 1: Recopilación de información secundaria

**Especies Invasoras:** Acercamiento teórico a la invasión biológica de especies en sus diferentes fases, desde la introducción hasta el desplazamiento de especies nativas. En cuanto a la biología de las especies invasoras, cuales son los atributos y estrategias que favorecen la invasión por parte de dichas especies. Entendimiento de los atributos y factores ambientales que hacen más vulnerable a un determinado ecosistema. Conocimiento de las diferentes entidades que tratan con este problema a diferentes escalas y cuales son los mecanismos de control y mitigación de impactos propuestos y ejecutados hasta el momento.

**Retamo espinoso (*Ulex europaeus*):** Entendimiento de la historia de la especie, tanto de su introducción como de sus diferentes usos, su biología y su particular comportamiento invasivo, además de las propiedades fenotípicas y demográficas que favorecen su condición de especie invasora. Reconocimiento de los factores y recursos limitantes para la especie. Revisión de los intentos de manejo, control y erradicación de la especie, los cuales brindan gran cantidad de información en cuanto a las interacciones de la especie con el medio (ciclaje de nutrientes, ciclo hidrológico, estructura del suelo, propensión a incendios, alelopatía, competencia, etc.)

**Área de estudio:** Obtención de mapas de la cuenca alta del río Bogotá que incluyeran información acerca de la distribución de los recursos y factores ambientales limitantes para la especie (cobertura vegetal, aridez, densidad rural, evapotranspiración, precipitación, radiación solar, altitud, pendiente, tipología del suelo, erosión, zonificación climática Caldas - Lang, proximidad a vías, ríos y cabeceras). Ver anexo 8.

## 5.2.2 Fase 2: Trabajo de campo

En un mapa 1:300000 del departamento de Cundinamarca (IGAC, 2007), se seleccionaron las vías principales y secundarias que ofrecieran un muestreo representativo de la cuenca, sin embargo, en varias ocasiones se tomaron trochas y caminos que no estaban en la ruta original. Muestreos sesgados a ambientes de fácil acceso como carreteras principales, bancos de los ríos o pueblos, pueden resultar a muestreos no representativos de las condiciones ambientales disponibles (Pearson, 2007).

El muestreo se realizó en moto. Se marcó un punto (GPS) cada vez que la especie era observada, sin importar el tamaño del parche o del individuo. Para cada punto se llenó un formato que incluye información complementaria acerca de la cobertura circundante, el uso del suelo y tamaño del parche además de observaciones generales (Ver anexo 5).

El muestreo fue únicamente de presencia, con el fin de evitar errores en la recolección de información. Según Pearson 2007, los errores de “*falsa presencia*” se dan cuando se notifica la ausencia de la especie al no ser detectada durante el muestreo, a pesar de que el ambiente sea adecuado para la presencia de la misma. El error radica en que el modelo interpretará la ausencia de la especie como *condiciones ambientales no adecuadas*, aunque éste no sea el caso. Las falsas ausencias pueden ocurrir; por error humano, es decir que la especie estaba ahí, pero no fue muestreada (la especie puede haber sido sometida a algún tipo de control, sus rizomas y semillas aun están latentes, pero su estructura epigea no es visible, este escenario es común con especies como *U. europaeus*), o simplemente la especie está ausente, pero el ambiente es adecuado para su existencia (posiblemente por pobre dispersión o dinámicas poblacionales). La inclusión de ausencias en el muestreo puede generar sesgos considerables en el análisis de la información (Hirzel *et al*, 2002).

### 5.2.3 Fase 3: Construcción de las capas ambientales

Utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (ESRI® ArcMap 9.2) y la información secundaria obtenida para el área de estudio, se generaron los mapas o “*capas ambientales*” donde se ubicaron las variables ambientales consideradas relevantes para el establecimiento de la especie.

El sistema SIG permite cambiar los sistemas de referencia geográfica, de manera que toda la información, tanto ambiental como biológica este referenciada en un mismo sistema de coordenadas, para poder extrapolar la información a una grilla (Peterson *et al*, 2002). Esto asegura la disponibilidad de la información ambiental para cada celda donde se haya registrado la especie. Estas celdas, que contienen tanto información ambiental como biológica son utilizadas para la construcción del modelo (Pearson 2007).

El estudio consideró 14 variables ambientales relevantes para la especie; proximidad a vías, proximidad a asentamientos, densidad rural, cobertura, altitud, pendiente, suelo, erosión, proximidad a ríos, zonificación climática, precipitación, aridez, evapotranspiración y radiación solar. Los mapas base se obtuvieron de diferentes fuentes; Corporación Autónoma Regional CAR, Facultad de estudios Ambientales y Rurales FEAR y SIG Colombia. (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Procesamiento de capas ambientales.

VARIABLE	MAPA	FUENTES	PROCESAMIENTO	TIPO
Distribución Actual	Distribución Observada de la especie	Muestreo realizado por Castillo y Mendoza (Junio-Julio de 2008)	Datos procedentes de GPS (Coordenadas WGS84), proyección a coordenadas planas (Colombia Bogotá Zone). Elaboración Shapefile y raster -ESRI @ ArcMap9.2.	Muestra
Proximidad a Vías	Proximidad a Vías	SIG Colombia (información de diferentes fuentes y fechas. Material académico en constante actualización). Shapefile: D:\SIGCOLOMBIA\base\vias.shp. Geometry Type: Line. Para Colombia.	Elaboración mapa de distancias utilizando herramientas de Spatial Analyst (Distance). Parámetros: Maximum distance: 10000m / Output cell size: 100. ESRI @ ArcMap 9.2	Continuo
Proximidad a Asentamientos	Proximidad a Cabeceras Municipales	SIG Colombia (información de diferentes fuentes y fechas. Material académico en constante actualización). Shapefile: D:\SIGCOLOMBIA\base\cabeceras.shp. Geometry Type: Polygon. Para Colombia	Elaboración mapa de distancias utilizando herramientas de Spatial Analyst (Distance). Parámetros: Maximum distance: 10000m / Output cell size: 100. ESRI @ ArcMap 9.2	Continuo
Densidad Rural	Municipal con Densidad Rural	* SIG Colombia (información de diferentes fuentes y fechas. Material académico en constante actualización). Shapefile: D:\SIGCOLOMBIA\base\municipios.shp. Geometry Type: Polygon. * DANE Censo 2005 en www.dane.gov.co consultado 15-09-08.	Al Polygon municipios.shp se adjuntó la información; densidad poblacional resto (DANE) para cada uno de los municipios, utilizando la herramienta joins and relates. Posteriormente se pasó a formato raster (Conversion tools). ESRI @ ArcMap 9.2	Categorico
Cobertura	Unidades del Paisaje	Facultad de Estudios Ambientales y Rurales (FEAR). Shapefile: up03.shp. Geometry Type: Polygon. Para el altiplano Cundiboyacense	Al Polygon up03.shp se pasó a formato raster, con la herramienta Conversion tools de ESRI@ ArcMap 9.2	Categorico
Altitud	Altitudinal	DTM (Digital Terrain Model). Facultad de Estudios Ambientales y Rurales (FEAR). Raster: altiplano30.tif. Para el altiplano Cundiboyacense.	Sin modificación	Continuo
Pendiente	Pendientes	DTM (Digital Terrain Model). Facultad de Estudios Ambientales y Rurales (FEAR). Raster: altiplano30.tif. Para el altiplano Cundiboyacense.	Se obtuvieron las pendientes utilizando la herramienta Surface Anaysis-Slope. Parámetros: Degree. Z factor: 1. Output Cell Size: 100. ESRI@ ArcMap 9.2	Continuo
Suelo	Suelos	Facultad de Estudios Ambientales y Rurales (FEAR). IGAC & ORSTROM.1984. Estudio General Preliminar. Estudio Regional Integrado del Altiplano Cundiboyacense. Bogotá. Colombia. Vol 5.Pag 11-27. 2D CAD Drawing Location : suelos-altiplano.dwg	Se utilizó el poligono (suelos-altiplano.dwg Polygon) al cual se adjuntó la tabla explicativa de la tipología utilizando la herramienta joints and relates. Posteriormente se transformó a formato tipo raster con la herramienta Conversions Tools de ESRI@ ArcMap 9.2	Categorico
Erosion	Grados de Erosión	Procesó: Grupo SIG-Subdirección Científica. Fuente: Modificado de Ecoforest-Swedforest- CAR 2001 en Atlas CAR 2001 Escala 1: 960.000 Archivo tipo: .jpeg	Se georeferenció la imagen (.jpeg) utilizando las herramientas de georeferencing con la proyección Colombia Bogota Zone. Se digitalizó la imagen crenado un polyline tipo shape (Erosion.shp). Se asignaron valores a las isolinneas en el Attribute table en ESRI @ ArcMap 9.2. El archivo Erosión.shp se interpoló utilizando la herramienta Topographic (Convert Contours to DEM) del software ENVI 4.3	Categorico

Proximidad a Rios	Proximidad a Rios	Facultad de Estudios Ambientales y Rurales (FEAR). Shapefile Feature Class: riosfin.shp Geometry Type: Line. Para el altiplano Cundiboyacense	Elaboración mapa de distancias utilizando herramientas de Spatial Analyst (Distance). Parametros: Maximum distance: 10000m / Output cell size: 100. ESRI® ArcMap 9.2	Continuo
Zonificación Climatica	Zonificación Climatica Caldas-Lang	Grupo SIG - Subdirección Científica - CAR 2001 en Atlas CAR 2001 Escala 1: 500.000 Archivo tipo: .jpeg	Se georeferenció la imagen (.jpeg) utilizando las herramientas de georeferencing con la proyección Colombia Bogota Zone. Se digitalizó la imagen crenado un polyline tipo shape (Caldas-Lang.shp). Se asignaron valores a las isolíneas en el Attribute table en ESRI® ArcMap 9.2. El archivo Caldas-Lang.shp se interpoló utilizando la herramienta Topographic (Convert Contours to DEM) del software ENVI 4.3.	Categórico
Precipitación	Distribución Espacial de la Precipitación	Grupo SIG - Subdirección Científica - CAR 2001 en Atlas CAR 2001 Escala 1: 500.000 Archivo tipo: .jpeg	Se georeferenció la imagen (.jpeg) utilizando las herramientas de georeferencing con la proyección Colombia Bogota Zone. Se digitalizó la imagen crenado un polyline tipo shape (Precipitacion.shp). Se asignaron valores a las isolíneas en el Attribute table en ESRI® ArcMap 9.2. El archivo Precipitacion.shp se interpoló utilizando la herramienta Topographic (Convert Contours to DEM) del software ENVI 4.3	Continuo
Aridez	Indice de Aridez de Martonne	Subdirección Científica - CAR 2001 en Atlas CAR 2001 Archivo tipo: .jpeg	Se georeferenció la imagen (.jpeg) utilizando las herramientas de georeferencing con la proyección Colombia Bogota Zone. Se digitalizó la imagen crenado un polyline tipo shape (aridez.shp). Se asignaron valores a las isolíneas en el Attribute table en ESRI® ArcMap 9.2. El archivo aridez.shp se interpoló utilizando la herramienta Topographic (Convert Contours to DEM) del software ENVI 4.3	Continuo
Evapotranspiración	Evapotranspiracion Potencial Metodo de Hargreaves	Subdirección Científica - CAR 2000 en Atlas CAR 2001 Escala 1: 500.000 Archivo tipo: .jpeg	Se georeferenció la imagen (.jpeg) utilizando las herramientas de georeferencing con la proyección Colombia Bogota Zone. Se digitalizó la imagen crenado un polyline tipo shape (EVAPOTRANSPIRACION.shp). Se asignaron valores a las isolíneas en el Attribute table en ESRI® ArcMap 9.2. El archivo EVAPOTRANSPIRACION.shp se interpoló utilizando la herramienta Topographic (Convert Contours to DEM) del software ENVI 4.3	Continuo
Radiación Solar	Radiacion Solar Media Anual	Grupo SIG - Subdirección Científica - CAR 2001 en Atlas CAR 2001 Escala 1: 500.000 Archivo tipo: .jpeg	Se georeferenció la imagen (.jpeg) utilizando las herramientas de georeferencing con la proyección Colombia Bogota Zone. Se digitalizó la imagen crenado un polyline tipo shape (RadiacionSolar.shp). Se asignaron valores a las isolíneas en el Attribute table en ESRI® ArcMap 9.2. El archivo RadiacionSolar.shp se interpoló utilizando la herramienta Topographic (Convert Contours to DEM) del software ENVI 4.3	Continuo

Los mapas provenientes de la CAR (aridez, evapotranspiración, precipitación, radiación solar, erosión y clima) solamente fue posible encontrarlos en formato *.jpeg*, por lo cual fue necesario georeferenciar las imágenes utilizando las herramientas “georeferencing” con proyección Colombia – Bogotá-Zone. Posteriormente se digitalizaron las imágenes a los cuales se les asignaron valores a las isolíneas en el “Attribute Table”. Con el fin de obtener capas ambientales más ricas en información, se decidió interpolar las imágenes ya digitalizadas

(excluyendo el mapa de clima de Caldas-Lang) utilizando “topographic tools” del programa ENVI 4.3.

El mapa de clima de Caldas-Lang tuvo un proceso diferente al resto de mapas provenientes de la CAR. El *Polyline.shp* original se paso a formato *Polygon.shp* utilizando “Data Management Tools – Feature to Polygon”, a cada polígono se le dio un valor climático en el “Attribute Table”, para después pasarlo a formato *Raster* utilizando “conversion Tools – Feature to Raster”.

Las variables “proxy” consideradas en este estudio fueron; proximidad a vías, proximidad a asentamientos y proximidad ríos. Los mapas base para estas variables eran formato *Polyline.shp*, utilizando la herramienta “Distance – Straight Line” del “Spatial Analyst”, con los siguientes parámetros: Maximum distance: 10000m y Output cell size: 100, se obtuvieron los mapas de proximidad en formato *Raster*.

Las capas ambientales de altitud y pendiente se realizaron con base en un DTM – SRTM 30m. (Digital Terrain Model) para el altiplano cundiboyacense. Para obtener las pendientes se utilizo la herramienta “Surface Analysis – Slope” del “Spatial Analyst” con los siguientes parámetros: Degree. Z factor: 1. Output Cell Size: 100, obteniendo un mapa de pendientes en formato *Raster*.

El mapa Municipal con Densidad Rural se realizó a partir de un mapa municipal en formato *Polygon.shp*, utilizando la herramienta “Joins and Relates” se adjunto la densidad rural a cada municipio, finalmente se paso a formato *Raster* utilizando “Conversion Tools – Feature to Raster”.

El mapa de Suelos se baso en un *Polygon.shp* de suelos para el altiplano cundiboyacense, el cual se paso a formato *Raster* (“Conversion Tools – Feature to Raster”) después de adjuntarle las unidades tipológicas utilizando la herramienta “Joins and Relates”.

Para la variable cobertura, se utilizó un mapa de unidades del paisaje en formato *Polyline.shp* para el altiplano cundiboyacense. Sin embargo este mapa no incluye información para la sub-cuenca del río Tunjuelo, considerando que este mapa tiene buena información de procedencia confiable (FEAR) se decidió excluir la zona faltante del área de estudio y consecuentemente del modelo. Esto redujo el área de estudio, de 4219 a 3293 km<sup>2</sup>. Sin embargo si fue incluida en el muestreo. Siendo un área claramente invadida por el retamo espinoso y de gran importancia ambiental, será discutida a pesar de no estar incluida en el modelo (Ver anexo 9).

Una vez se tuvieron los 14 mapas en formato *Raster*, se “recortaron” en función de la cuenca. Utilizando la herramienta “Spatial Analyst – Map Algebra”, obteniendo las 14 capas ambientales del mismo tamaño y resolución; una hectárea (grilla de 100 x 100km), esta resolución se consideró apropiada para una extensión de 4219 km<sup>2</sup> (área de la cuenca alta del río Bogotá).

### **5.2.3.1 Generación de la Matriz de Correlación**

Con el fin de evitar ruido en el modelo, fue necesario correr un coeficiente de correlación entre las 14 variables (todas con todas). El programa escogido para esto fue *Matlab*, ya que este puede realizar correlaciones con grandes cantidades de datos. Para esto, era necesario convertir cada una de las 14 matrices en formato ASCII. Este proceso se llevó a cabo en EXCEL donde se programó un Macro para convertir las matrices. Estas 14 se “cargaron” a *Matlab*, el cual generó una matriz de correlación. La matriz muestra que no existe correlación alguna entre las variables, ya que ninguno de los valores está por encima de 0.7 (Green, 1979). Al saber que no existía correlación entre las variables, fue posible correr el modelo con todas las capas ambientales (Ver tabla 2).

Tabla 2. Matriz de correlación

	Altitud	Aridez	Prox a cabeceras	Zonificación climática	Cobertura	Densidad rural	Erosión	Evapotranspiración	Pendiente	Precipitación	Radiación solar	Proximidad a rios	Suelo	Prox a vías
Altitud	1,0000	-0,1004	0,3849	-0,5809	-0,0564	-0,0580	-0,0570	-0,2358	0,5357	0,1512	-0,3743	0,1546	-0,2412	0,4109
Aridez	-0,1004	1,0000	-0,2084	-0,0320	-0,0220	0,1193	-0,2021	0,5345	-0,0223	0,4653	0,4299	-0,0257	0,0658	-0,0292
Prox a cabeceras	0,3849	-0,2084	1,0000	-0,1948	0,0453	-0,1972	0,1548	-0,1486	0,1131	-0,1315	-0,2801	0,0978	0,0132	0,1884
Zonificación climática	-0,5809	-0,0320	-0,1948	1,0000	0,1924	-0,1398	0,2118	0,2797	-0,2819	-0,1731	0,3866	-0,0565	0,1713	-0,1837
Cobertura	-0,0564	-0,0220	0,0453	0,1924	1,0000	-0,0631	0,4102	-0,0641	0,0010	-0,1704	-0,0237	0,1028	0,1260	-0,0994
Densidad rural	-0,0580	0,1193	-0,1972	-0,1398	-0,0631	1,0000	-0,2951	0,2472	0,0404	0,1783	-0,0845	-0,0716	0,0076	-0,0046
Erosión	-0,0570	-0,2021	0,1548	0,2118	0,4102	-0,2951	1,0000	-0,1760	-0,0531	-0,1586	-0,0558	0,1242	0,0716	-0,1345
Evapotranspiración	-0,2358	0,5345	-0,1486	0,2797	-0,0641	0,2472	-0,1760	1,0000	-0,0735	0,4690	0,6072	-0,1587	0,1183	-0,0197
Pendiente	0,5357	-0,0223	0,1131	-0,2819	0,0010	0,0404	-0,0531	-0,0735	1,0000	0,1093	-0,1591	0,1844	-0,2304	0,2080
Precipitación	0,1512	0,4653	-0,1315	-0,1731	-0,1704	0,1783	-0,1586	0,4690	0,1093	1,0000	0,3522	-0,0664	-0,1054	0,0644
Radiación solar	-0,3743	0,4299	-0,2801	0,3866	-0,0237	-0,0845	-0,0558	0,6072	-0,1591	0,3522	1,0000	-0,1090	0,0637	-0,0500
Proximidad a rios	0,1546	-0,0257	0,0978	-0,0565	0,1028	-0,0716	0,1242	-0,1587	0,1844	-0,0664	-0,1090	1,0000	0,1575	0,1040
Suelo	-0,2412	0,0658	0,0132	0,1713	0,1260	0,0076	0,0716	0,1183	-0,2304	-0,1054	0,0637	0,1575	1,0000	-0,1099
Prox a vías	0,4109	-0,0292	0,1884	-0,1837	-0,0994	-0,0046	-0,1345	-0,0197	0,2080	0,0644	-0,0500	0,1040	-0,1099	1,0000

#### 5.2.4 Fase 4: Aplicación y calibración del modelo

La aplicación de un modelo logístico permite integrar y analizar las variables ambientales, con la ocurrencia observada de la especie, a través de celdas, que contienen tanto la información ambiental (capas ambientales) como la biológica (ocurrencia observada). El modelo MAXENT 3.2.1 ® aplica la ley de máxima entropía, calcula una distribución amplia, cercana a la uniformidad. Hace énfasis en como el ambiente en donde ocurre la especie, se relaciona con el resto del área de estudio (“background”). Este método utiliza variables categóricas como continuas y el resultado es siempre una predicción continua. Además, permite calcular la distribución de las especies desde una información incompleta. Es un modelo que goza de una buena capacidad predictiva en comparación con otros modelos (Elith et al., 2006; Pearson et al., 2007; Phillips et al., 2006).

Para correr el modelo MAXENT 3.2.1 ® fue necesario convertir los mapas de las capas ambientales en formato *Raster* a formato ASCII y agruparlos en una carpeta. Para evitar desfases entre las capas ambientales y asegurar el correcto funcionamiento del modelo, fue necesario abrir los archivos ASCII de cada capa y asegurarse que tanto las filas como las columnas concordaran. En cuanto a la capa biológica (ocurrencia observada), los puntos se proyectaron para Colombia (Bogota-Zone).

Una vez se tenían las capas ambientales y biológicas en los formatos aceptados por MAXENT, se introdujeron al programa y se seleccionaron como continuas o categóricas. Se escogió el formato de salida logístico ya que es más fácil de conceptualizar por que proporciona un estimado de probabilidad de presencia entre 0 y 1.

La opción “Settings – Random Test Percentage” le indica al modelo que porcentaje de los registros (muestreo) tomar para realizar pruebas y algunos análisis estadísticos simples. El valor sugerido por la literatura y utilizado en este trabajo es de 25.

La opción “Settings – Regularization Multiplier (R.M)” le indica al modelo el nivel de enfoque o ajuste de la distribución de salida. El valor por defecto es 1, valores por debajo de este, arrojaran una distribución mas ajustada y localizada.

La opción “Maximum Iterations (M.I)” le indica MAXENT el numero máximo de veces que deberá correr el modelo para cada variable.

Para la cuenca alta del río Bogotá, MAXENT 3.2.1 ® se corrió 10 veces cambiando los diferentes parámetros del modelo (Ver anexo 3). Se escogieron los tres modelos mas dicientes y explícitos. Modelos con diferentes parámetros de ajuste y de inclusión de variables ambientales.

El modelo arroja como parte de los resultados, un mapa de probabilidad de ocurrencia (en formato .png, compatible con ESRI ® ArcMap 9.2). Estos se

abrieron en ArcMap 9.2 con el fin de permitir la interacción con otros mapas y capas para generar resultados.

Sin embargo, los mapas que arroja MAXENT, incluyen los puntos de muestreo lo cual no permite apreciar completamente las predicciones. Con el fin de mejorar visualmente el mapa, este se reclasificó para contar únicamente con dos clases, de  $0 - 0.65 = 0$  (baja probabilidad de condiciones adecuadas) y  $0.65 - 1 = 1$  (alta probabilidad de condiciones adecuadas).

MAXENT arrojó también diferentes pruebas estadísticas como La Prueba Jackknife para la ganancia de los datos de entrenamiento. En esta prueba, se excluye una variable y se genera un modelo con las variables restantes. Creando un modelo con cada variable de manera aislada y también un modelo con todas las variables. La prueba *Jackknife*, a los datos de entrenamiento es de gran importancia, ya que es la que realmente explica estadísticamente el efecto del ajuste.

Las predicciones realizadas por el modelo MAXENT se validaron con la curva ROC. Esta describe la relación entre la proporción de presencias observadas correctamente predichas (sensibilidad) y la proporción de ausencias observadas incorrectamente predichas ( $1 -$  especificidad). De esta curva deriva el índice AUC (Area Under the Curve). Este índice va desde 0.5, para modelos que no son mejores que el azar, hasta 1.0, para modelos con habilidad predictiva perfecta. Evaluar el rendimiento predictivo del modelo o validación es vital para el desarrollo del modelo, ya que la aplicación del modelo no tendría sentido sin evaluar la precisión de sus predicciones (Pearson, 2007).

## 6. Resultados

### 6.1 Áreas con mayor probabilidad de presencia – invasión

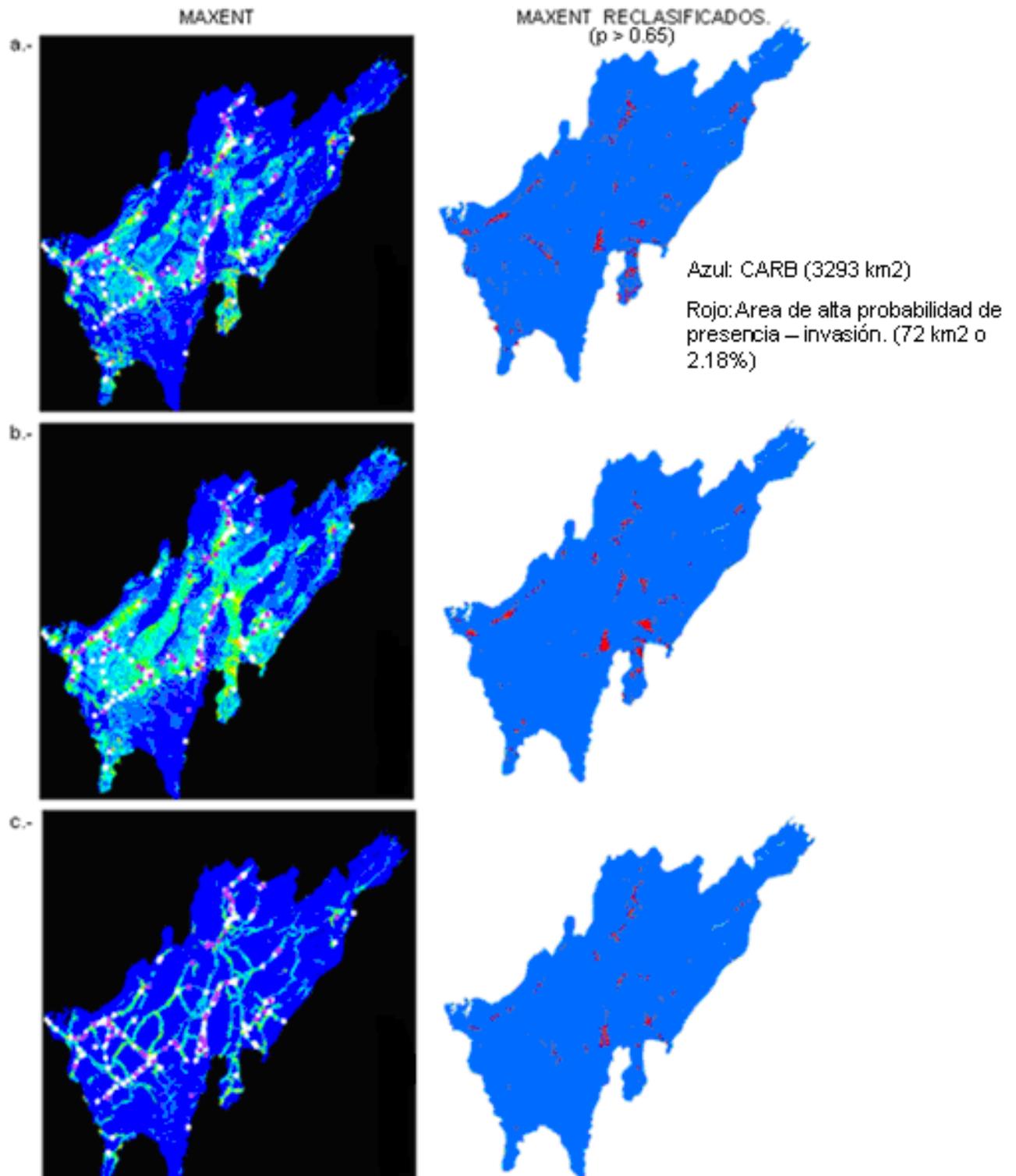


Figura 4. Mapas de probabilidad de ocurrencia. a.- Ajuste 0.1, sin prox a vías. b.- Ajuste 1, sin prox a vías. c.- Ajuste 0.1, todas las capas.

MAXENT se corrió 10 veces con diferentes parámetros. De estos 10 modelos se escogieron tres, repeticiones 8,9 y 10 (ver anexo 10). La figura 4a, representa el modelo con el mayor poder de discriminación (modelo 8), esta figura muestra que las áreas con alta probabilidad presencia – invasión, están fragmentadas y distribuidas en la cuenca (principalmente en las zonas de menor altitud). Estas tienen en total un área de 7200 ha o 2.18% del área de estudio. La figura 4b refleja el comportamiento de un modelo menos ajustado, mientras que la figura 4c muestra el efecto de la proximidad a vías en el modelo.

## 6.2 Poder explicativo de las variables

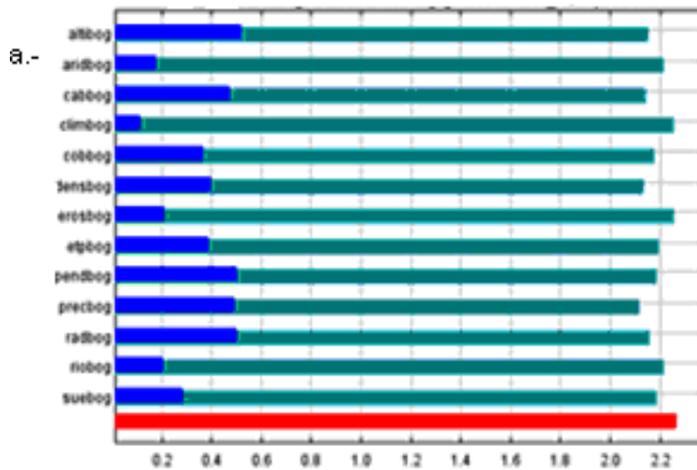
### 6.2.1 Contribución porcentual de las variables

Para el modelo 8 (ver anexo 10), las variables que más explican la probabilidad de presencia – invasión son; precipitación, altitud y radiación solar (tabla 3a). La magnitud de la contribución de las variables varía según el ajuste y el número de variables incluidas (ver tabla 3b y 3c). Sin embargo, las tres variables mencionadas anteriormente se mantienen dentro de las más explicativas en los tres modelos.

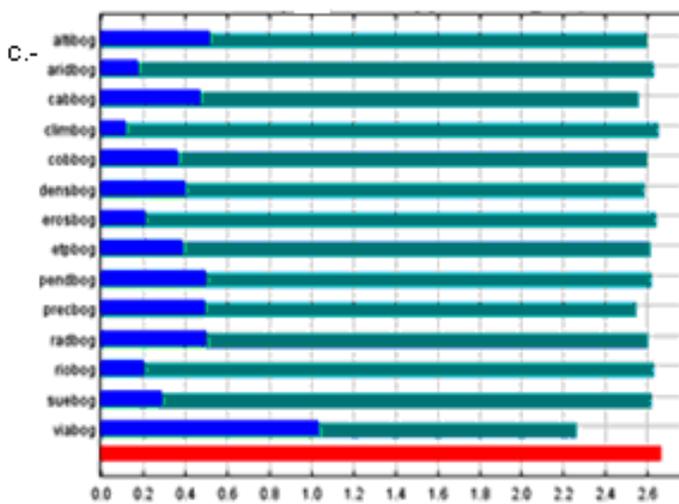
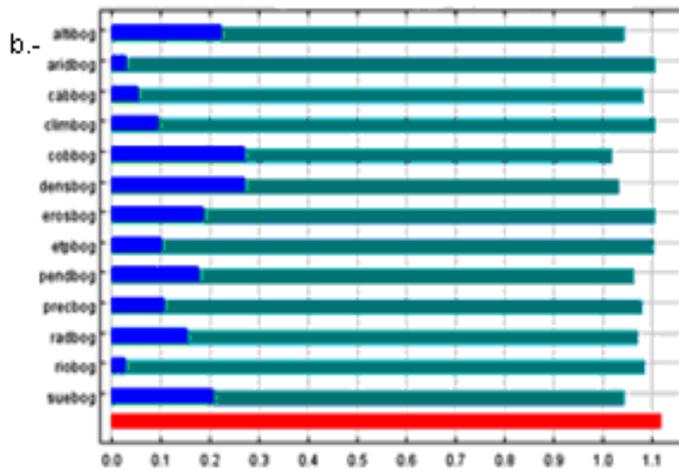
Tabla 3. Contribución de las Variables. a.- Ajuste 0.1. Sin prox. a vías. b.- Ajuste 1. Sin prox. a vías. c.- Ajuste 0.1. Todas las capas.

a.-	Variable	Percent contribution	b.-	Variable	Percent contribution	c.-	Variable	Percent contribution
	Precipitación	15.2		Cobertura	19.8		Prox. a vías	37.7
	Altitud	14.5		Altitud	17.1		Precipitación	8.6
	Radiación Solar	10		Densidad rural	12.1		Cobertura	7.5
	Cobertura	9.8		Precipitación	8.6		Radiación Solar	6.8
	Prox. a cabeceras	8.8		Suelo	8.2		Prox. a cabeceras	6.5
	Evapotranspiración	8.1		Radiación Solar	8		Altitud	6.3
	Pendiente	8		Pendiente	7		Evapotranspiración	4.7
	Densidad rural	6.8		Clima	5.3		Densidad rural	4
	Suelo	5.5		Erosión	5.2		Pendiente	4
	Aridez	4.3		Evapotranspiración	3.3		Clima	3.7
	Clima	3.1		Prox. a cabeceras	2.6		Suelo	3.5
	Prox. a ríos	3		Prox. a ríos	1.6		Erosión	2.5
	Erosión	2.8		Aridez	1.3		Aridez	2.2
							Prox. a ríos	1.9

## 6.2.2 Prueba Jackknife: Ganancia de los datos de Entrenamiento



Variable Climática	Código
Altitud	Altibog
Aridez	Aridbog
Prox a Cabeceras	Cobbog
Clima	Climbog
Cobertura	Cobbog
Densidad Rural	Densbog
Erosion	Erosbog
Evapotranspiración	Etpbog
Pendiente	Pendbog
Precipitación	Precbog
Radiación Solar	Radbog
Prox. A Ríos	Riobog
Suelo	Suebog
Prox. A Vías	Viabog



### Explicación:

Eje X: Ganancia

Eje Y: Variable

**Barras verdes:** Sin la variable

**Barras azules:** Solo con la variable

**Barras rojas:** Todas las variables

Figura 5. Pruebas Jackknife: Ganancia de los datos de Entrenamiento. a.- Ajuste 0.1. Sin prox. a vías. b.- Ajuste 1. Sin prox. a vías. c.- Ajuste 0.1. Todas las capas.

La figura 5 muestra la ganancia que genera cada variable en tres diferentes escenarios; corriendo el modelo con una sola variable (azul), con todas las variables menos una (verde) y con todas las variables (rojo). Esto refleja cuanta información útil contiene cada variable. La figura 5a muestra como en el modelo 8, ninguna variable contiene información útil que no este contenida en otras variables. Mientras que para el modelo 9, la variable proximidad a vías si contiene información que no esta presente en otras variables (ver figura 5c).

### 6.2.3 Distribución de probabilidad de presencia - invasión en áreas protegidas

La figura 6 explica la relación espacial entre las áreas más vulnerables a la presencia – invasión y las áreas destinadas a la conservación. Es evidente que estas dos áreas no se cruzan, es decir que las áreas destinadas a la conservación, no ofrecen condiciones adecuadas para la presencia – invasión del retamo espinoso.

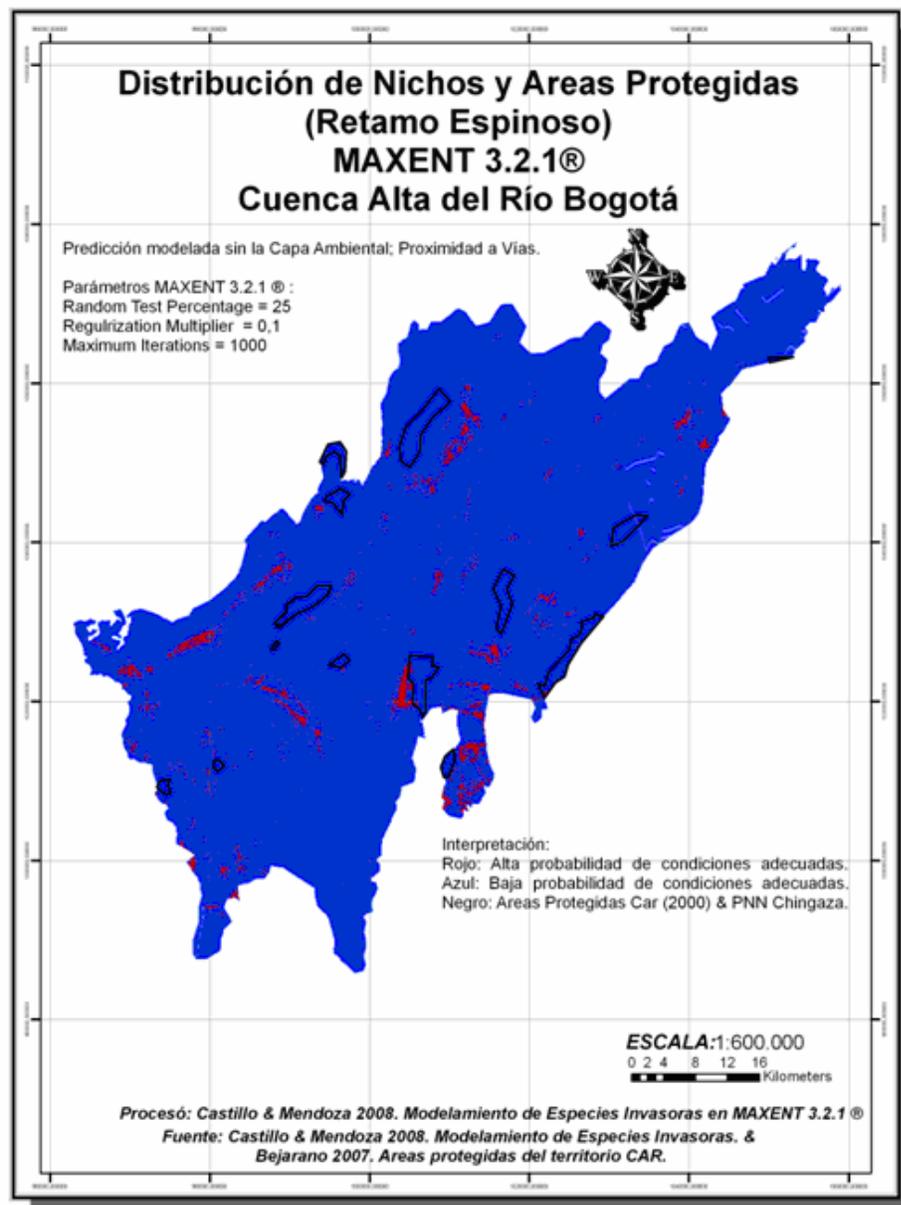


Figura 6. Distribución de nichos y áreas protegidas.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 Parámetro de Ajuste (*Regularization Multiplier*)

De los diez modelos realizados con MAXENT, se escogió como ideal el ajuste de 0.1. Al evaluar las predicciones arrojadas por modelos muy ajustados (0.01), se observó una disminución considerable en el tamaño y la cantidad de áreas con *alta probabilidad de condiciones ideales* (rojo en el mapa), debido a que una predicción muy localizada se ajusta estrechamente a los registros de presencia y no generaliza bien la información (Phillips, 2006). Por otro lado, un modelo demasiado amplio, generaliza en exceso la información, generando más áreas de *condiciones típicas de aquéllos lugares donde la especie se encuentra* (verde) y de *baja probabilidad de condiciones adecuadas* (azul claro) Ver anexo 3.

Teniendo en cuenta el principio de precaución, es necesario maximizar en el modelo, las áreas de alta probabilidad de condiciones ideales, especialmente cuando se trata de una especie tan agresiva y generalista como el retamo espinoso.

### 7.2 Variables Ambientales de Alta Importancia Estadística

#### 7.2.1 Proximidad a Vías

A pesar de que no se encontró ninguna variable correlacionada (Ver tabla 2), fue necesario correr un modelo sin la capa ambiental *Proximidad a vías*, ya que estadísticamente, esta variable sesga los datos en exceso, principalmente debido a la naturaleza del muestreo, ya que la accesibilidad de las vías fue un aspecto importante durante el muestreo.

El modelo explica la probabilidad de ocurrencia de la especie prácticamente con esta sola variable, según el análisis de contribución de las variables, *Proximidad a*

vías explica el 37.7% de la distribución y la siguiente variable más importante es *Precipitación* con el 8.6% (Ver tabla 3c).

El modelo realizado con *Proximidad a vías* tiene el mayor índice de AUC; 0.989 de los tres modelos, es decir, un modelo casi perfecto. *La curva de la tasa de omisión y área predicha* lo corrobora, ya que la omisión sobre las muestras de prueba se ajusta muy bien a la tasa de omisión predicha, más que en cualquier otro modelo.

La prueba *Jackknife* (Ver figura 5), excluye una variable y genera un modelo con las variables restantes. Creando un modelo con cada variable de manera aislada y también un modelo con todas las variables. Cuando el modelo se corre únicamente con *Proximidad a vías*, este genera el doble de ganancia que las demás variables (barra azul oscuro). Además, cuando el modelo se corre con todas las variables, también se genera más ganancia que en los demás modelos (barra roja). Si el modelo se corre sin *Proximidad a vías* (barra azul claro), la ganancia del modelo disminuye considerablemente, sugiriendo que esta variable contiene una cantidad sustancial de información útil, que no esta contenida en las otras variables. (Ver Figura 5c.).

La prueba *Jackknife* explica el peso estadístico de la variable *Proximidad a Vías*, pero las curvas de respuesta, complementan esta información al explicar la relación espacial entre la variable y la probabilidad de distribución (Ver figura 7).



Figura 7. Respuesta de *Ulex europaeus* a proximidad a vías.

Esta curva muestra como la probabilidad de ocurrencia (eje Y) incrementa al aumentar la proximidad a las vías (eje X), es decir que la especie prefiere invadir suelos perturbados al lado de las vías.

Es probable que estos resultados se deban a la biología de la especie, el retamo es una especie ruderal que suele adaptarse bien a suelos degradados como los bordes de caminos y carreteras (Castro y Vanegas, 2000). La naturaleza de su introducción y uso, también puede explicar la importancia estadística de la variable proximidad a vías, esta especie es utilizada principalmente como cerca viva, colindando generalmente con las vías. Además, el muestreo se realizó en su mayoría, a lo largo de vías y caminos. También es notable que la infraestructura vial nacional atraviesa toda la cuenca y toma como eje central a Bogotá (Mendoza, 2000). Por último, el formato llenado en campo también corrobora una mayor presencia del retamo en los bordes de carreteras y caminos (Ver anexo 5).

### **7.2.2 Precipitación y Altitud**

Al correr el modelo sin la capa ambiental *Proximidad a vías*, el índice AUC para los datos de entrenamiento baja muy poco (de 0.989 a 0.979) y la contribución de las variables se vuelve más homogénea. Las variables *Precipitación* y *Altitud* suben a los primeros lugares, explicando el 15.2% y 14.5% de la distribución respectivamente. Esto responde a la biología de la especie, ya que según Castro y Vanegas (2000), el retamo prefiere suelos de drenaje deficiente y una humedad atmosférica alta, además que las condiciones de sequía limitan su competitividad. La curva de respuesta para esta variable lo corrobora (Ver figura 8), ya que muestra que la mayor probabilidad de ocurrencia ocurre entre los 1200 y 1400 mm. (Precipitación total anual). La curva forma una asíntota después de 1400 milímetros porque esa es la precipitación máxima para la cuenca.

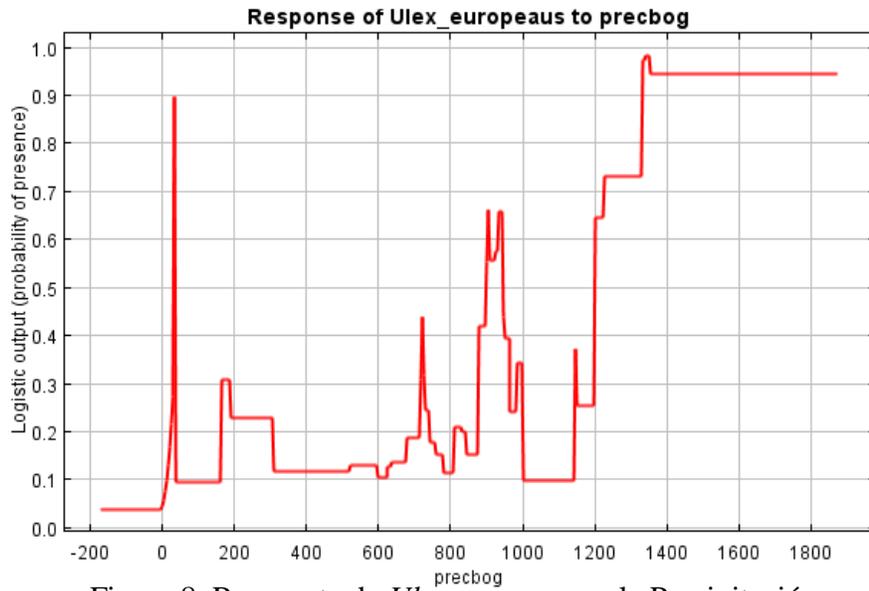


Figura 8. Respuesta de *Ulex europeaus* a la Precipitación.

En cuanto a la importancia estadística de la altitud, esta se explica ya que la altitud determina la temperatura y la distribución geográfica del retamo espinoso depende primordialmente de la temperatura. Su ventaja competitiva esta restringida a las partes bajas, el gradiente de páramo dificulta su expansión, principalmente por la acidez del suelo, el frío, las heladas, la resequedad fisiológica y la poca disponibilidad de nutrientes (Castro y Vanegas, 2000).

Un experimento realizado por Thornton (1995), demostró que la capacidad del retamo espinoso para fijar nitrógeno disminuye durante el invierno, sugiriendo que las bajas temperaturas disminuyen la ventaja competitiva de la especie.

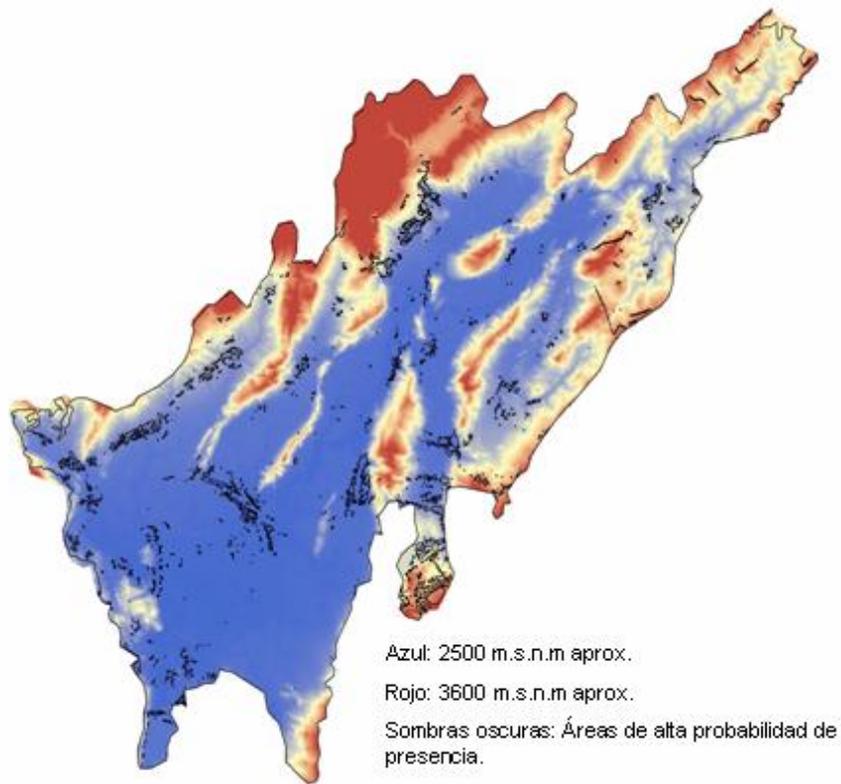


Figura 9. Altitud Vs. Probabilidad de presencia – invasión.

Esta especie cuenta con un rango altitudinal marcado; entre 2500 y 3200 m.s.n.m. concentrado a los 2700 msnm (Castro y Vanegas, 2000), esto se evidencia en la figura 9, donde se ve que la probabilidad de condiciones ambientales adecuadas es inversamente proporcional a la altitud, es decir que la mayor probabilidad de condiciones ambientales adecuadas para la especie, se encuentra en las áreas azules (2500 m.s.n.m). Sin embargo, Ríos (2005), menciona el establecimiento de la especie en ecosistemas de alta montaña en la Cordillera Oriental de Bogotá, como bosque andino, altoandino y páramo (3400 – 3500 m.s.n.m).

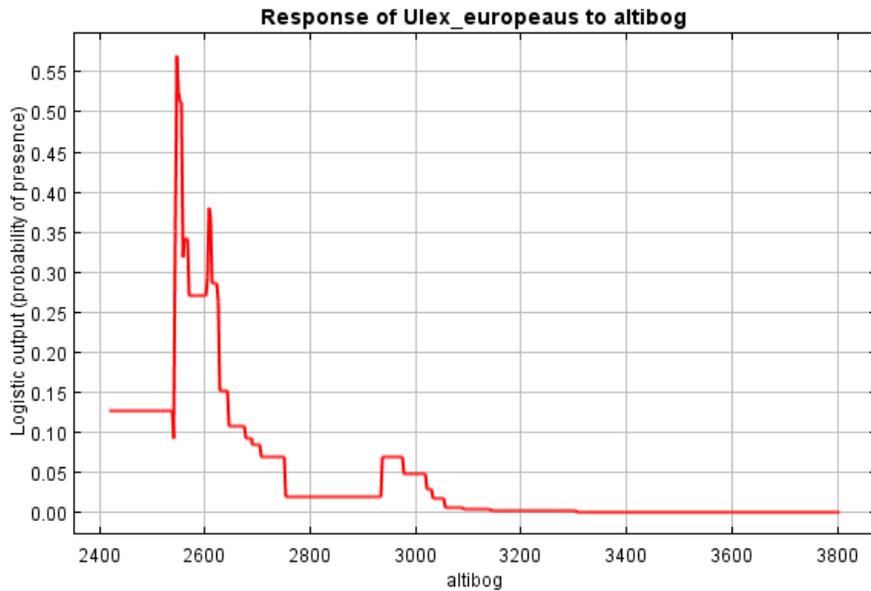


Figura 10. Respuesta de *Ulex europaeus* a la Altitud.

Durante el muestreo, en varias ocasiones se registró la especie por encima de los 3000 m, La altura máxima registrada fue de 3014 m. en la reserva *Encenillo* (Guasca) (Ver anexo 2). Por otro lado, la curva de respuesta para esta variable corrobora la afirmación de Castro y Vanegas (2000), ya que existe probabilidad de ocurrencia entre los 2500 y 3300 m.s.n.m (Ver figura 10), sin embargo el pico se encuentra entre 2500 y 2600 m.s.n.m. aproximadamente, no en 2700 m.s.n.m. En cuanto a la afirmación de Ríos (2005), el modelo no muestra probabilidad de ocurrencia encima de los 3300m, mucho menos entre los 3400 y 3500 m.s.n.m.

### 7.2.3 Radiación Solar y Cobertura

Otras dos variables que explican la probabilidad de ocurrencia de la especie son *Radiación Solar* y *Cobertura*, con el 10 y 9.8% respectivamente (Ver tabla 3ª). Era de esperarse que para una especie estrictamente heliófila, la radiación solar sea estadísticamente importante. Se ha demostrado que fotoperíodos más cortos afectan el desarrollo de los juveniles y demoran la formación de las espinas (Bieniek y. Millington, 1968). La cuenca alta del río Bogotá esta claramente

ubicada en la zona ecuatorial, donde la radiación solar es alta durante todo el año, haciéndola aún más vulnerable a la invasión biológica del retamo espinoso.

Al igual que la mayoría de los elementos climatológicos, el comportamiento de la radiación solar está en directa relación con la altitud (CAR, 2001), esta disminuye a medida que se asciende altitudinalmente. Es probable que por esta razón, la variable *Altitud* explique la probabilidad de distribución en mayor medida que otras variables ambientales climáticas como: *Aridez*, *Evapotranspiración*, *Clima*, *Radiación Solar*.

La variable Cobertura, según CAR (2001), más del 60% de la cuenca comprende tierras intervenidas como cultivos permanentes, cultivos temporales y pastos, además, más de la mitad de la cuenca presenta procesos erosivos. Esta es una especie que prefiere áreas taladas o quemadas, zonas agrícolas y bosques abiertos, tanto naturales como plantados (Matthews, 2006). El retamo frecuenta áreas perturbadas por el hombre y prefiere invadir áreas de alta productividad. Al poder fijar Nitrógeno, la especie puede colonizar áreas donde nada más crece como suelo desnudo y minas abandonadas (HEAR, 2008). Debido a su condición heliofílica, el retamo espinoso no coloniza lugares cubiertos por dosel sino lugares abiertos como bordes de carretera y corredores ribereños (Sanchez-Tapia, 2007).

Es posible que la estrecha relación estadística entre *Radiación Solar* y *Cobertura*, se deba a la necesidad de luz que presenta la especie, es decir las dos variables responden al mismo aspecto biológico.

## 7.3 Variables Ambientales de Baja Importancia Estadística

### 7.3.1 Zonificación Climática Caldas - Lang

Se esperaba que la variable ambiental Zonificación Climática Caldas - Lang explicara en gran medida la probabilidad de distribución de la especie, ya que el clima es un factor determinante en la invasión biológica. La falta de adaptación a un nuevo clima, junto con la competencia, la perturbación y la enfermedad, son consideradas razones para la no viabilidad de la invasión biológica (Lodge 1993, Moyle 1986, Newsome y Noble, 1986). En el caso específico del retamo espinoso, como se mencionó anteriormente, la mayoría de los eventos climáticos están estrechamente ligados a la variable ambiental *Altitud*. Si consideramos entonces que la Zonificación Climática de Caldas - Lang esta basada en la altitud y en la relación precipitación - temperatura (CAR, 2001), es de esperarse entonces, que la información que la variable Zonificación Climática Caldas - Lang pudiera ofrecer, ya esté contenida en otras variables como *Altitud* o *Precipitación*.

Las variables climáticas son de gran importancia para entender la distribución de las especies invasoras, no solo en un escenario actual, si no también en uno futuro. Es claro que la ventaja competitiva del retamo esta limitada a tierras bajas, lejos de temperaturas extremas y la acidez del suelo paramuno (Ríos, 2005), sin embargo, al aumentar la temperatura como producto del calentamiento global, el nicho de la especie podría ascender altitudinalmente, permitiéndole establecerse por encima de los 3500 m.s.n.m. Además, la vegetación de páramo es abierta no de dosel, lo cual facilita aún más la invasión. Esto dejaría como único factor tensionante, la acidez del suelo y la poca disponibilidad de nutrientes, pero la capacidad de la especie para fijar nitrógeno atmosférico le permitiría sobrellevar estas desventajas.

### 7.3.2 Proximidad a ríos

Durante el muestreo se observó una relación evidente entre la presencia de la especie y los cuerpos de agua (Ver anexo 5), por esta razón se esperaba que la variable *Proximidad a ríos* explicara significativamente la probabilidad de ocurrencia de la especie. Además, una de las estrategias de dispersión de la especie es a través de las corrientes de agua (Hoshovsky, 1989 en ISSG), por esta razón la especie coloniza los bancos de los ríos (Matthews, 2006). Es posible que la variable *Proximidad a ríos*, no contenga información útil, ya que esta puede estar contenida en otras variables como *Cobertura*; debido a su condición heliofílica, el retamo espinoso no coloniza lugares cubiertos por dosel sino lugares abiertos como bordes de carretera y corredores ribereños (Sánchez-Tapia, 2007).

### 7.3.3 Erosión

Como se mencionó anteriormente el retamo frecuenta áreas perturbadas por el hombre y prefiere invadir áreas de alta productividad. La capacidad de fijar Nitrógeno, le permite colonizar áreas donde nada más crece, como suelo desnudo y minas abandonadas (HEAR, 2008). Además si consideramos que la cuenca está seriamente degradada y transformada, que más de la mitad sufre de procesos erosivos. Por estas razones, se esperaba que la variable *Erosión* explicara en alguna medida importante la distribución de la especie. Sin embargo es posible que la información de erosión esté contenida en otras variables como *Pendiente*; la cual está estrechamente ligada a la erosión o *Suelo*; la tipología de suelo incluye algunos parámetros de erosión.

La curva de respuesta para esta variable (Figura 11), refleja la preferencia de la especie por los sustratos erosionados y degradados. La mayor probabilidad de distribución es en áreas con erosión severa a muy severa (5), no hay información (8).

El mapa *Grados de Erosión* (Ver anexo 6), muestra que las zonas que presentan erosión severa a muy severa, están ubicadas en la Sabana de Bogotá y en otras tierras bajas, es posible que por esta razón la variable *Erosión* haya generado tan poca ganancia en el Jackknife, porque la variable *Altitud*, la incluía de cierto modo.

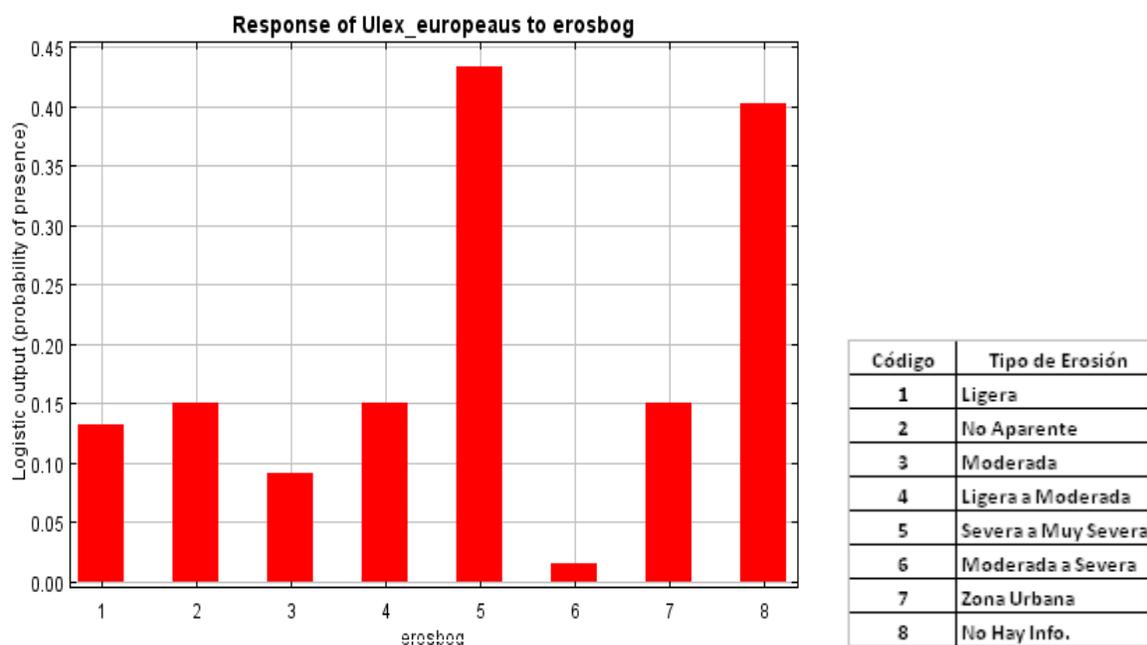


Figura 11. Respuesta de *Ulex europaeus* a la Erosión.

La prueba *Jackknife* (Ganancia de los datos de Entrenamiento), muestra que las variables *Clima*, *Proximidad a ríos* y *Erosión*, no contienen información útil que no este contenida en otras variables, ya que la barra azul claro no decrece cuando se omite la variable del modelo y cuando el modelo se corre únicamente con la variable clima, la ganancia es mínima. (Ver Figura 5<sup>a</sup>).

## 7.4 Distribución de la Probabilidad de Ocurrencia

Realmente lo que se está modelando es la distribución de los ambientes adecuados (nichos), no la distribución de las especies como tal (Pearson, 2007). El reflejo espacial del nicho, más las características geográficas (barreras) y el potencial de colonización de la especie dan como resultado el rango geográfico de una especie. Especies como el retamo espinoso tienen un rango geográfico amplio, porque cuentan con un altísimo potencial de colonización gracias a su rápido crecimiento, capacidad de reproducirse tanto sexual como asexualmente, prolífica producción de semillas, amplia capacidad dispersiva, efectiva defensa (fuertes espinas), y la capacidad de fijar nitrógeno. Al ser una especie generalista, en cuanto a casi todas las variables ambientales, son las barreras geográficas como cadenas montañosas de altura, las que limitan o aminoran el paso de la invasión biológica (Ver figura 9).

Se considera que una especie está en equilibrio con su ambiente físico cuando ésta, se encuentra en todas las áreas adecuadas y no se encuentra en las áreas no adecuadas. Además especies con una alta capacidad de dispersión, están más cerca del equilibrio (Pearson, 2007), como es el caso del retamo espinoso. Si observamos el mapa *Distribución de la Probabilidad de Ocurrencia* (Ver anexo 3), vemos que los puntos de muestreo, se encuentran sobre la mayoría de las áreas donde la probabilidad de ocurrencia es alta. Esto probablemente se deba a que los modelos de distribución, se basan en censos de ocurrencia observada para dar información en cuanto a la distribución de los nichos de una especie, pero también puede estar reflejando el estado de equilibrio de la especie y su facilidad para ocupar áreas ambientalmente adecuadas.

El retamo espinoso es una especie generalista que goza de un alto potencial de colonización. Esta cualidad se puede entender estadísticamente, si analizamos la Figura 5, observamos que con excepción de *Proximidad a vías*, ninguna variable contiene información útil que no esté en otras variables, esto se entiende porque

ninguna de las barras verdes, disminuye considerablemente, eso quiere decir que cuando jackknife corre el modelo omitiendo cualquiera de las variables, no afecta su desempeño.

Considerando que el análisis de correlación no mostró valores significativos para ninguna variable, es posible que las variables por si solas no pesen tanto peso estadístico porque la especie es generalista y ninguna variable le afecta excesivamente. Esta característica se hace evidente también de manera espacial, el Anexo 3 (Distribución de la Probabilidad de Ocurrencia) muestra que tanto los registros (ocurrencia observada), como la distribución de la probabilidad de ocurrencia están dispersos en toda la cuenca. Esto refleja el potencial de colonización de la especie (generalista) y las condiciones adecuadas que ofrece la cuenca a la invasión.

## **7.5 Vulnerabilidad de la cuenca**

La predicción que arroja el modelo, refleja que la Cuenca Alta del Río Bogotá es vulnerable a la invasión biológica del retamo espinoso. El área total considerada en este estudio es de 3293 km<sup>2</sup> (Ver anexo 9) y la suma de las áreas de alta probabilidad de presencia es de 72 km<sup>2</sup>, es decir que el 2.18% de la cuenca alberga condiciones adecuadas para el establecimiento del retamo espinoso. Esta cifra no refleja el porcentaje de la cuenca invadido por el retamo, únicamente el área donde se encuentra una alta probabilidad de condiciones adecuadas para la especie. Es muy posible que el retamo se encuentre por fuera de estas áreas, por aislamiento geográfico, introducción voluntaria u otras variables. Las especies invasoras deben contar con ciertos atributos o mecanismos que aumentan su capacidad de invasión, pero también deben darse las condiciones ecológicas apropiadas para asegurar el éxito de la invasión (Rejmanek y Richardson, 1996). Condiciones como la baja diversidad de especies nativas, los altos niveles de

perturbación (tanto naturales como antropogénicos) y la posible ausencia de competidores, predadores, parásitos o enfermedades (Zabaleta, 2007).

Al analizar las variables estadísticamente, se observa que las que mas explican la probabilidad de ocurrencia son *Proximidad a vías, Altitud, Precipitación y Cobertura*. La cuenca es atravesada por una extensa malla vial, lo cual favorece la invasión.

Gran parte de la cuenca se encuentra en una altitud promedio de 2500 a 2700 m.s.n.m. (Ver anexo 7. Mapa Altitudinal), presenta lomas, colinas y pendientes suaves, lo cual, junto con la calidad de los suelos y la oferta hídrica, la hacen ideal para el establecimiento del retamo espinoso.

La cuenca alta del río Bogotá pertenece a la Zona Húmeda Montañosa, con una precipitación anual de 1000 a 1400 mm. Los cerros que bordean la sabana acumulan humedad durante todo el año, generando una oferta importante de humedad, facilitando la invasión.

Como se mencionó anteriormente, la especie compete mejor en ecosistemas intervenidos y simplificados por su condición heliófila, más del 60% de la cuenca esta conformada por cultivos y pastos, además de canteras y suelos degradados, coberturas donde la especie compete muy bien gracias a su capacidad de fijar nitrógeno.

## **7.6 Probabilidad de Ocurrencia en Áreas Protegidas**

El mapa de Distribución de Nichos y Áreas Protegidas (Figura 6), muestra que la probabilidad de condiciones adecuadas en las áreas protegidas es baja, es decir que las áreas protegidas de la cuenca alta del río Bogotá, no son vulnerables a la invasión del retamo espinoso.

Esto se debe principalmente a que la gran mayoría de las áreas protegidas corresponden a ecosistemas de bosque altoandino o páramo, es decir áreas por encima del óptimo altitudinal de la especie, donde la temperatura y la acidez del

suelo, no le permiten competir muy eficazmente (Ver Anexo 12. Ubicación Altitudinal de las Áreas Protegidas)

Otra razón que explica esta configuración espacial, es que por lo general, estas áreas protegidas son ecosistemas maduros y estructurados que se mantienen en un estado sucesional avanzado. El grado de diversidad de la comunidad receptora, juega un papel determinante de restricción a la invasión, imponiendo limitaciones; al aumentar la competencia y disminuir el número de nichos vacíos, esta dinámica conocida como “resistencia biótica” disminuye la invasibilidad de los ecosistemas (Ríos, 2005).

Sin embargo, estas no son razones para confiarse, la continua transformación de la matriz, hace cada vez más pequeñas y aisladas a estas áreas protegidas. Existen niveles críticos de transformación, dentro de los cuales existe o no la ocurrencia de la invasión. Estos niveles críticos dependen de los patrones espaciales de perturbación y de la capacidad de dispersión de las especies. La importancia de la estructura del paisaje disminuye al aumentar el rango de dispersión de las especies invasoras (With, 2002). Especies agresivas como el retamo espinoso no necesita de grandes perturbaciones para comenzar el proceso de invasión, incluso pueden infiltrarse en hábitats nativos a través de los bordes.

## **7.7 Limitaciones del estudio**

Es necesario entender que un modelo y sus predicciones son solo tan buenos como los datos que se utilizan en él. Existieron dos grandes limitantes para el estudio. La accesibilidad del área de estudio, lo cual dificultó el muestreo, en ocasiones limitándolo a las vías. El acceso limitado a información climática, existen trabas institucionales que hacen que la obtención de mapas sea muy larga, difícil o costosa. Además, no están unificadas en escala o criterios.

Cada evento de invasión cuenta con una dinámica particular, producto de la combinación entre las características del agente invasor y del ecosistema hospedero, de las respuestas de ambos al entrar en contacto, junto con una serie de eventos estocásticos (Sánchez-Tapia y Vargas, 2007). Por esta razón, los modelos de distribución de especies no pueden predecir la distribución de una especie en su totalidad, ya que incluir en un modelo eventos estocásticos como la introducción voluntaria o la globalización, es casi imposible. Existen otras variables que limitan el rango geográfico de las especies y que tampoco puede incluir el modelo, variables como la capacidad de colonización de la especie y las barreras geográficas (naturales o antrópicas)

Sin embargo es una poderosa herramienta que permite entender un fenómeno tan complejo como la invasión biológica, problema que no responde únicamente a la movilidad de especies por razones comerciales; en la actualidad la transformación de las coberturas naturales, la simplificación de los ecosistemas y los cambios climáticos globales aumentan la invasión de los diferentes ecosistemas.

## 8. Conclusiones

El retamo espinoso es una especie con un altísimo potencial de colonización. Dicho potencial se refleja en la probabilidad de distribución de sus nichos. Las condiciones adecuadas para la especie se distribuyen por casi toda la cuenca, lo cual le brinda a la especie un carácter generalista. Las diferentes características biológicas de la especie le permiten competir eficazmente con especies nativas y colonizar áreas degradadas que otras especies no pueden.

Estadística y ecológicamente la variable ambiental limitante para la expansión del retamo espinoso es la altitud, la relación entre la ocurrencia de la especie y esta variable es inversa. Esta variable explica en mayor medida la probabilidad de ocurrencia de la especie, debido a la relación ecológica que existe entre las variables climáticas como temperatura y la altitud.

El desarrollo socioeconómico manifestado en crecimiento urbano y vial, es también una variable determinante para el establecimiento del retamo espinoso. Esto se refleja en la importancia estadística que tiene la proximidad a las vías en la probabilidad de ocurrencia de la especie.

La Cuenca Alta del Río Bogotá es considerablemente vulnerable a la invasión biológica del retamo espinoso. Esta “invasibilidad” o vulnerabilidad a la invasión, responde a la estructura ecológica y social de la cuenca.

La presencia de una ciudad como Bogotá, potencializa la vulnerabilidad de la cuenca a la invasión del retamo espinoso. Considerando que es una especie que responde positivamente a la transformación y simplificación de los ecosistemas, la degradación ambiental y la erosión.

El retamo espinoso no representa una amenaza considerable a la integridad ecológica de las áreas protegidas encontradas dentro de la cuenca. Principalmente debido a que estas se encuentran por encima del rango altitudinal de la especie.

En un eventual escenario de aumento en la temperatura por calentamiento global, podría existir el riesgo de invasión a los páramos. Estos ecosistemas podrían considerarse vulnerables, debido a su estructura (abierto, sin dosel) y al aislamiento geográfico.

La Cuenca Alta del Río Bogotá es un área estratégica tanto a nivel socioeconómico como ambiental. Por esta razón, el costo de la invasión biológica del retamo espinoso podría ser demasiado alto.

El modelamiento de distribución de especies es una herramienta poderosa para explicar la distribución de especies invasoras. En particular, el modelo MAXENT 3.2.1 ® goza de una muy buena capacidad predictiva, en un formato amigable y sencillo. Sin embargo, los modelos estadísticos no son más que acercamientos a la compleja realidad de la invasión biológica de especies.

## 9. Bibliografía

- Andrén H; Delin A; Seiler A. 1997. Population Response to Landscape Changes Depends on Specialization to Different Landscape Elements. *Oikos*. 80 (1): 193-196.
- Barrera C; Ríos A; Pinzón C. 2002. Planteamiento de una propuesta de restauración ecológica de áreas afectadas por el fuego y/o invadidas por el retamo espinoso (*Ulex europaeus* L) en los cerros de Bogotá D.C.
- Bejarano, M. 2007. Áreas Protegidas del Territorio CAR. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- Bieniek M y Millington W. 1968. Thorn Formation in *Ulex europaeus* in Relation to Environmental and Endogenous Factors. *Botanical Gazette*. 129 (2): 145-150.
- Castro L y Vanegas V. 2000. Infestación de retamo espinoso (*Ulex europaeus*). Guía para la restauración de ecosistemas nativos en las áreas rurales de Santa Fé de Bogotá. DAMA, Bogotá,
- Clément B. 1990. Plant Strategies and Secondary Succession on Brittany Heathlands after Severe Fire. *Journal of Vegetation Science*. 1 (2):195-202.
- Convention on Biological Diversity. CBD. 2008. [www.cbd.int](http://www.cbd.int)
- Corporación Autónoma Regional. 2001. Atlas Ambiental CAR. Litografía Arco S.A. Bogotá D.C. Colombia.
- Dale V; Brown S; Haeuber R; Thompson Hobbs N; Naiman N; Riebsame W; Turner M; Valone T. 2000. Ecological Principles and Guidelines for Managing the Use of Land. *Ecological Applications*.10 (3).
- Dunning J; Danielson B; Pulliam R. 1992. Ecological Processes That Affect Populations in Complex. *Oikos*. 65 (1):169-175.
- Edwards K, Kvet J, Adams M. 2007. Competitive abilities of native european and non-native north american populations of *lythrum salicaria*. *Ekológia*.
- Egunjobi J. 1971. Ecosystem Processes in a Stand of *Ulex Europaeus* L.: I. Dry Matter Production, Litter Fall and Efficiency of Solar Energy Utilization. *The Journal of Ecology*.59 (1):31-38.
- Elith, J., C. Graham, and the NCEAS species distribution modeling group. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151.
- Etter A. Wyngaarden W. 2000. Patterns of Landscape Transformation in Colombia, with Emphasis in the Andean Region. Royal Swedish Academy of Sciences. *Ambio*. 29 (7).
- Etter A; Villa A. 2000. Andean Forests and Farming Systems in Part of the Eastern Cordillera (Colombia). *Mountain Research and Development*. 20 (3): 236-245.
- Etter, A; McAlpine C; Wilson K; Phinn S; Possingham S. 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 114: 369–386.

- Gaston K; Blackburn T; Goldewijk K. 2003. Habitat Conversion and Global Avian Biodiversity Loss. *Biological Sciences*. 270 (1521):1293-1300.
- Goodwin B; McAllister A; Fahrig L. 1999. Predicting Invasiveness of Plant Species Based on Biological Information. *Conservation Biology*. 13 (2):422-426.
- Green, R. 1979. *Sampling Design and Statistical Methods of Environmental Biologists*. Wiley. New York.
- Gustafson, E. 1998. Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? *Ecosystems*. 1 (2):143-156.
- Gutiérrez F. 2006. Estado de conocimiento de especies invasoras. Propuesta de lineamiento para el control de los impactos. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá D.C. – Colombia.
- Hawaiian Ecosystems At Risk Project. HEAR. 2008. [www.hear.org](http://www.hear.org).
- Higgins S; Richardson D; Cowling R. 1996. Modeling invasive plant spread: The role of plant-environment interactions and model structure. *Ecology*.
- Hirzel A; Hausser H; Chessel D; Perrin N. 2002. Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability map without absence data. *Ecology*. 83: 2027-2036.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2007. Mapa del Departamento de Cundinamarca 1:300 000. IGAC. Bogotá D.C.
- Internacional Legume Database and Information Service. ILDIS. 2008. [www.ildis.org](http://www.ildis.org)
- Invasive Species Specialist Group. ISSG. 2008. [www.issg.org](http://www.issg.org).
- Kraft C; Sullivan P; Karateyev A; Burlakova L, Nekola J; Johnson L; Padilla D. 2002. Landscape Patterns of an Aquatic Invader: Assessing Dispersal Extent from Spatial Distributions. *Padilla Ecological Applications*. 12 (3): 749-759.
- Levine J; Vila M; D'Antonio C; Dukes J; Grigulis K; Lavorel S. 2003. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions. The Royal Society.
- Lomolino M, Riddle B, Brown J. 2006. *Biogeography Third Edition*. Sinauer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts.
- Lozano J. 2007. Modelamiento espacial de la probabilidad de invasión de palma africana (*Elaeis guineensis*) en bosques de galería del piedemonte llanero (Meta). Trabajo de grado para optar por el título de Ecólogo. FEAR.
- Macdonald, G. M. 1993. Fossil pollen analysis and the reconstruction of plant invasions. *Advances in Ecological Research*. 24:67-110.
- Matthews S. y Brandt K. 2006. *South America Invaded: the growing danger of invasive alien species*. Global Invasive Species Programme.
- McNeely, J.A., H.A. Mooney, L.E. Neville, P. Schei, and J.K.Waage (eds.). 2001. *A Global Strategy on Invasive Alien Species*. IUCN Gland, Switzerland, and Cambridge, UK.
- Mendoza, A. 2000. POT Cuenca alta del río Bogotá. Gobernación De Cundinamarca Departamento Administrativo De Planeación. Bogotá D.C.

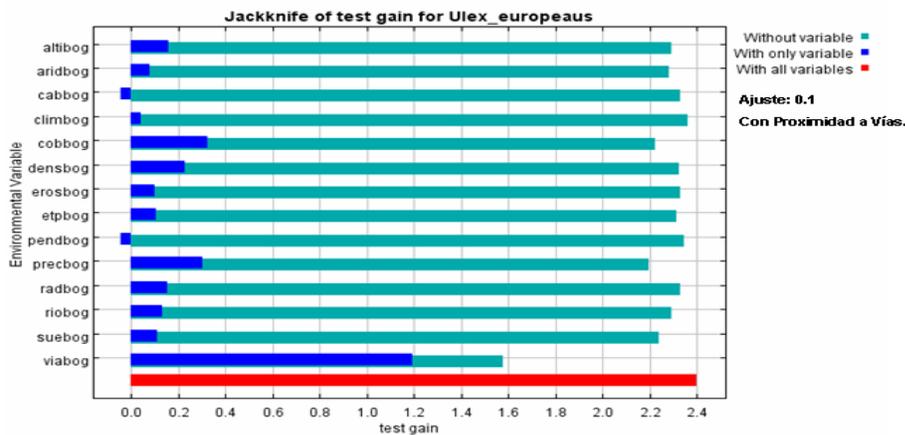
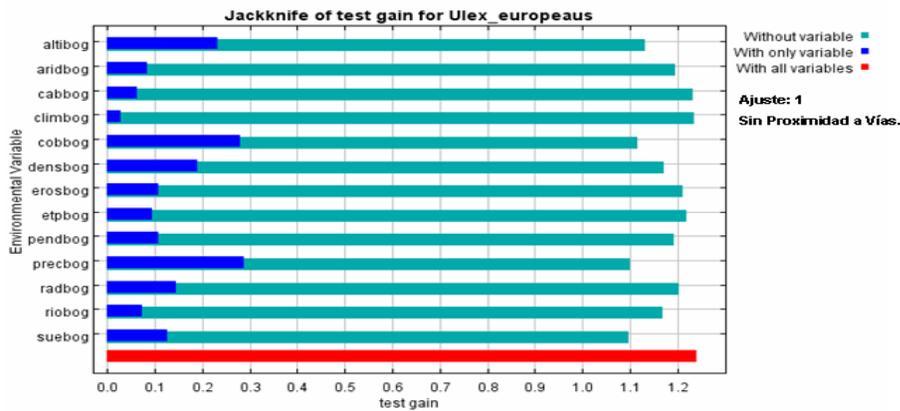
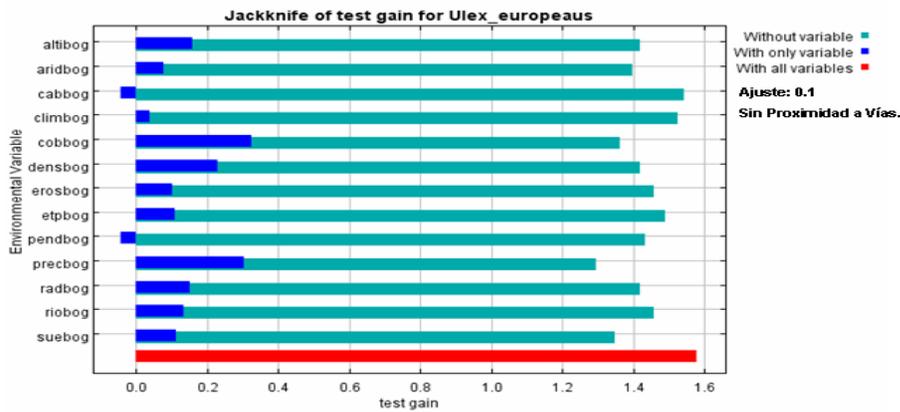
- Milbau A y Stout J. 2008. Factors associated with alien plant transitioning from casual, to naturalized, to invasive. Society for Conservation Biology.
- Millener L. 1962. Day-Length as Related to Vegetative Development in *Ulex europaeus*. *Ecotypic Variation with Latitude*. *New Phytologist*. 61 (2):119-127.
- Molinero M. 2001. La regresión logística. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión.
- Mooney H y Cleland E. 2001. The evolutionary impact o invasive species. *National Academy of Sciences Colloquium*. 98 (10).
- Morris D. 1995. Habitat selection in mosaic landscapes. *Mosaic landscapes and ecological processes*. Chapman and Hall, London: 110- 135.
- Ojima, D; Galvin K; Turner B. 1994. The Global Impact of Land-Use Change. *BioScience*. 44 (5): 300-304.
- Parker M; Malek W; Parker I. 2006. Growth of an invasive legume is symbiont limited in newly occupied habitats. *Diversity and Distributions*. 12: 563–571.
- Pearson R. 2007. Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. Center for Biodiversity and Conservation y Department of Herpetology. American Museum of Natural History.
- Pearson, R.G., W. Thuiller, M.B. Araújo, E. Martinez-Meyer, L. Brotons, C. McClean, L. Miles, P. Segurado, T.P. Dawson, and D. Lees. 2006. Model-based uncertainty in species' range prediction. *Journal of Biogeography*. 33: 1704-1711.
- Peterson A; Ortega-Huerta M; Bartley J; Sanchez-Cordero V; Soberon J; Buddemeier R; Stockwell D. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*. 416: 626-629.
- Phillips S; Anderson R; Schapire R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231-259.
- Phillips. S, Dudik. M. and Schapire. R. A. 2005. Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Ecological Modelling*.
- Prado-Castillo y Montoya, Montoya S. *sin año*. Diseño de experiencias piloto como estrategias de restauración ecológica en potreros abandonados e invadidos por retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en la sub-cuenca media y alta del río Teusacá, cerros orientales de Bogotá. DAMA.
- Rees M y Hill R. 2001. Large-scale disturbances, biological control and the dynamics of gorse populations. *Journal of Applied Ecology*. 38: 364–377.
- Rejmanek, M, Richardson, D. 1996. What attributes make some plants species more invasive? *Ecology*.
- Richardson M, Pysěk P. 2006. Plant invasions: merging the concepts of species invasiveness and community invasibility. *Progress in Physical Geography*.
- Ríos H. 2005. Guía técnica para la restauración ecológica de áreas afectadas por especies vegetales invasoras en el distrito capital. Subdirección científica; Grupo de ecología de la restauración. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

- Sakai A; Allendorf F; Holt J; Lodge D; Molofsky J; With K; Baughman S; Cabin R; Cohen J; Ellstrand N; McCauley D; Oneil D; Parker I; Thompson J; Weller S. 2001. The Population Biology of Invasive Species. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 32: 305-332.
- Sánchez-Tapia A y Vargas O. 2007. Efecto del sombreado artificial sobre el retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en el embalse de Chisacá. En: Restauración ecológica del bosque altoandino. Estudios diagnósticos y experimentales en los alrededores del embalse de Chisacá (localidad de Usme, Bogotá). UNAL. Facultad de ciencias, departamento de biología. Bogotá D.C.
- Sánchez-Tapia A. 2007. Las invasiones de especies exóticas. En: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. UNAL. Facultad de ciencias, departamento de biológica. Bogota D.C.
- Scott B. 2005. The Temporal Effects of *Ulex europaeus* on Soil Properties, and Modeling Impact of Invasive Species with Respect to Time. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Washington.
- The Global Invasive Species Programme. GISP. 2008. [www.gisp.org](http://www.gisp.org)
- Thornton B. 1995. Effects of Nitrogen Supply on the Seasonal Re-Mobilization of Nitrogen in *Ulex europaeus*. *Phytologist*. 130 (4): 557-563.
- Tinker P; Lal R; Bullock P; Valentin C; Kijne J; Fell H. 1997. The Environmental Implications of Intensified Land Use in Developing Countries. *Philosophical Transactions: Biological Sciences. Land Resources: On the Edge of the Malthusian Precipice?* 352 (1356): 1023-1033.
- UICN. 2005. The Precautionary Principle Project: Pautas para aplicar el principio de precaución a la conservación de la biodiversidad y la gestión de los recursos naturales.
- Vargas O. 2007. Guía metodológica para la restauración de áreas invadidas por el retamo espinoso. En: Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. UNAL. Facultad de ciencias, departamento de biológica. Bogota D.C.
- Vitousek P; D'Antonio L; Loope L; Westbrooks R. 1996. Biological invasions as global environmental change. *American Scientist*. 84: 468-478.
- With K. 2002. The landscape ecology of invasive spread. *Conservation Biology*. 16 (5): 1102-1203.
- With K. 2004. Assessing the Risk of Invasive Spread in Fragmented Landscapes. *Risk Analysis*. 24 (4).
- World Conservation and Monitoring Centre. 1992. Global biodiversity: status of the earth's living resources. Chapman y Hall. London: 196-197.
- Zabaleta A. 2007. Caracterización horizontal y vertical de los bancos de semillas de *Ulex europaeus* L. En parches de diferentes tamaños. En: Restauración ecológica del bosque altoandino. Estudios diagnósticos y experimentales en los alrededores del embalse de Chisacá (localidad de Usme, Bogotá). UNAL. Facultad de ciencias, departamento de biología. Bogotá D.C.

## 10. Anexos

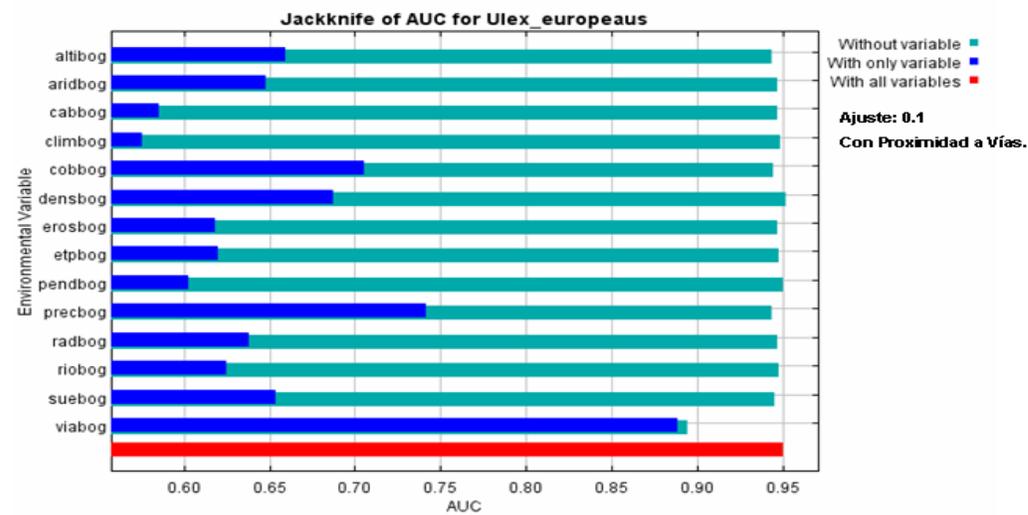
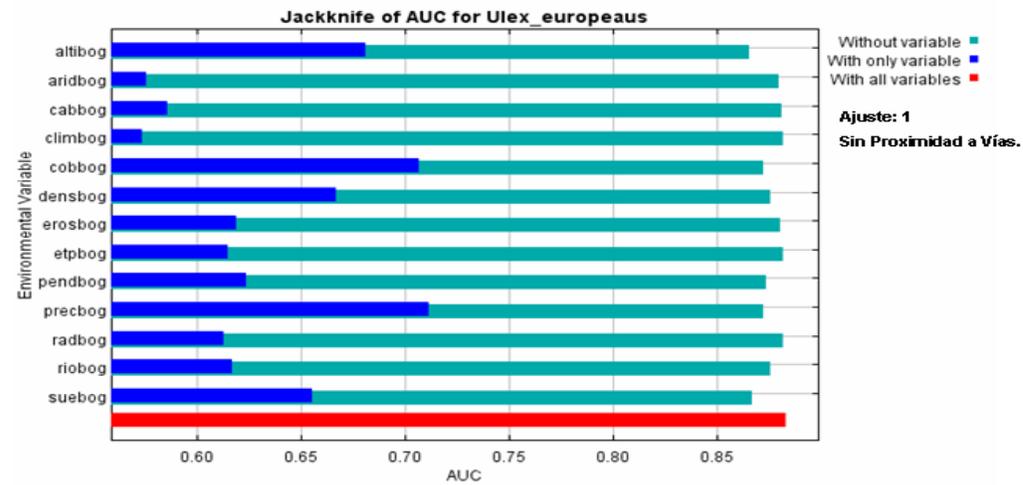
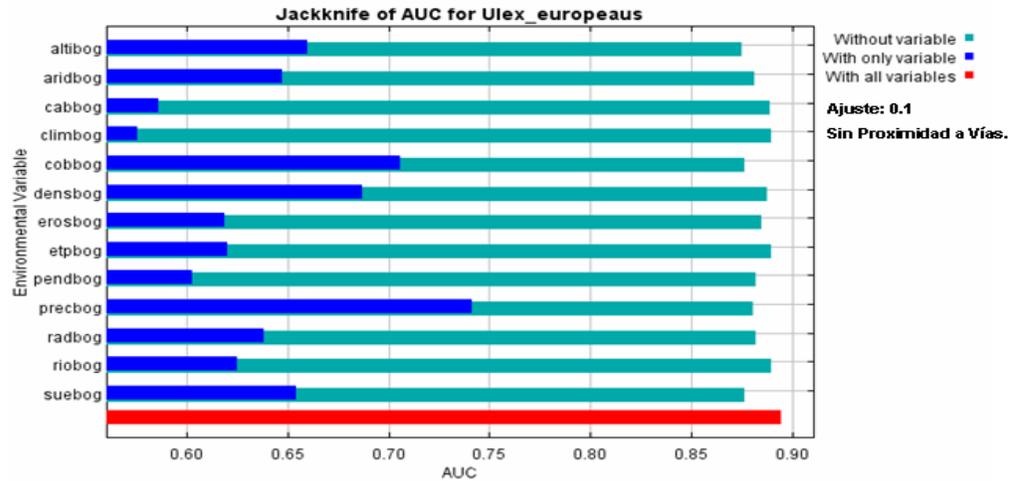
### 10.1 Pruebas Jackknife: Ganancia de los Datos de Prueba

En esta prueba, se excluye una variable y se genera un modelo con las variables remanentes. Creando un modelo con cada variable de manera aislada y también un modelo con todas las variables, pero utilizando la ganancia de los datos de prueba. Las conclusiones acerca de las variables más importantes pueden cambiar.

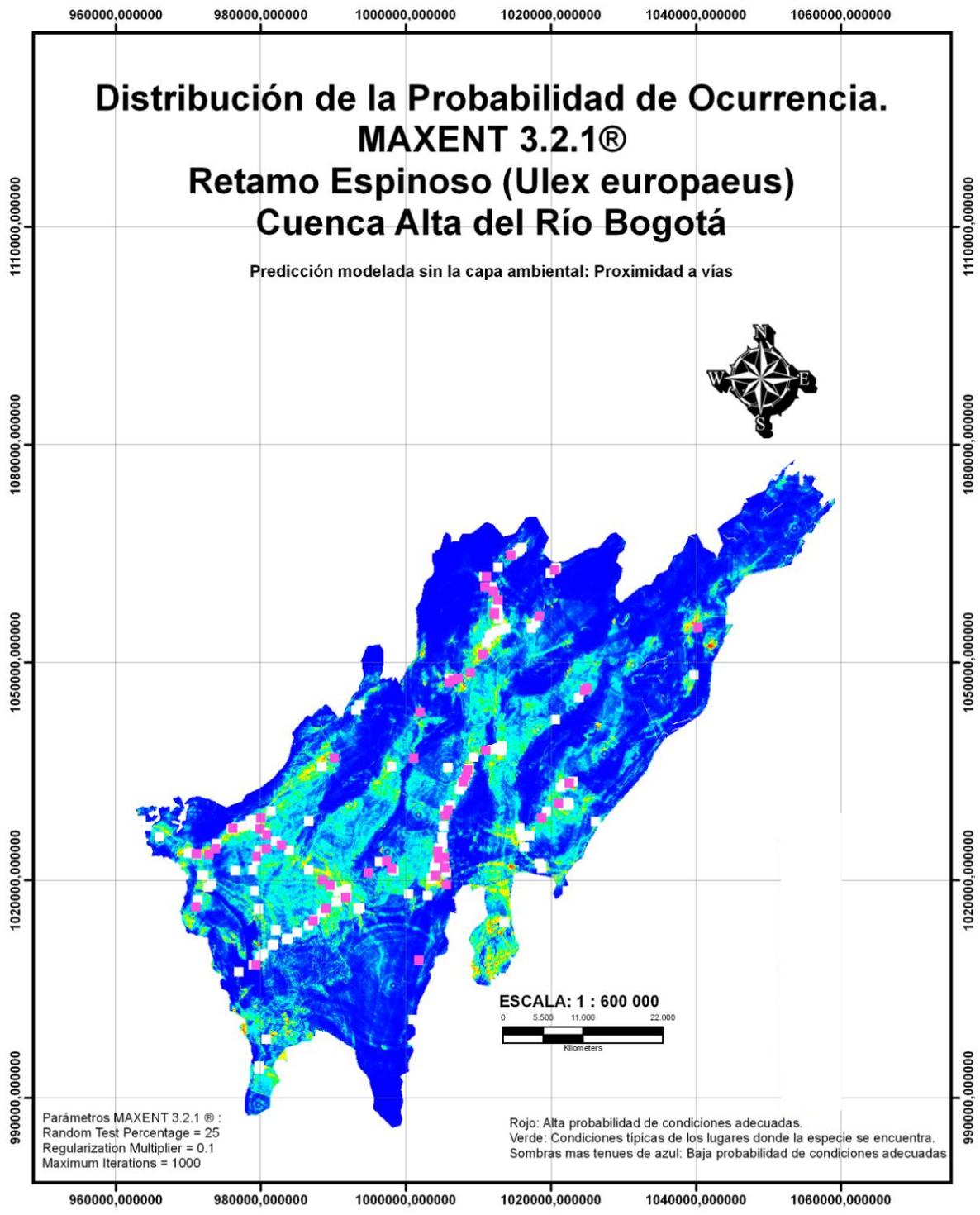


## 10.2 Prueba Jackknife para AUC

Esta es la prueba jackknife utilizando el índice AUC sobre los datos de prueba.



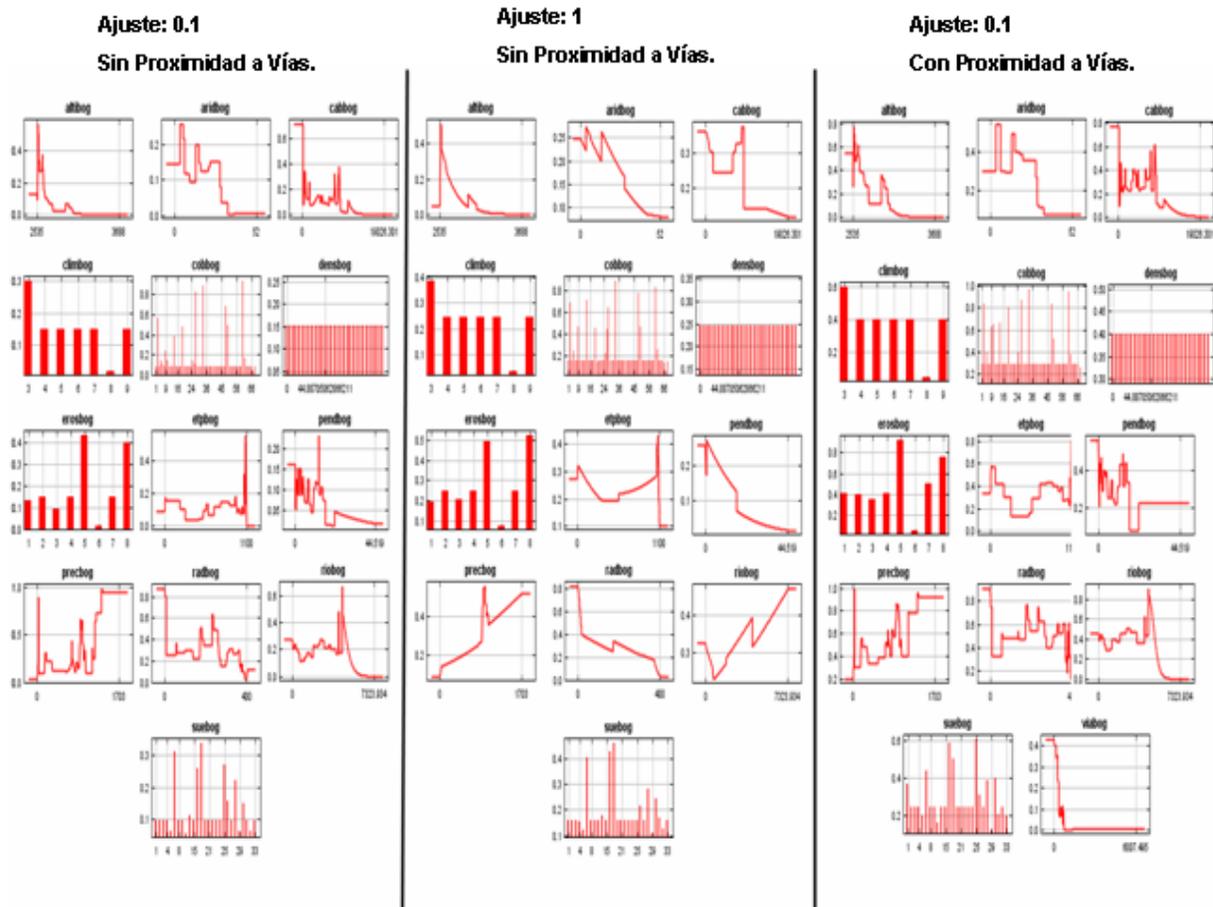
### 10.3 Mapa Distribución de la Probabilidad de Ocurrencia



Procesó: Castillo & Mendoza 2008. Modelamiento de Especies Invasoras en MAXENT 3.2.1 ®.  
Fuente: Castillo & Mendoza 2008. Modelamiento de Especies Invasoras

## 10.4 Curvas de Respuesta

Estas curvas muestran como cada variable ambiental afecta las predicciones realizadas por MAXENT. Muestran también como la predicción logística cambia a medida que varían las variables ambientales. Es decir, estas curvas muestran el efecto marginal de cambiar una variable.



### 10.5 Tabla Formato Complementario de Campo

PUNTO No.	PENDIENTE	TAMAÑO PARCHE	COBERTURA / USO										OBSERVACIONES				
			Via	Cobertura natural	Bosque Natural	Rio (cuerpos de agua)	Asentamientos	Humedal	Bosque plantado	Potrero abandonado	Pastizal	Cerca viva		Agrícola			
4	Plano	Pequeño															
5	Plano	Pequeño															Humedal Guaymaral
6	Media	Pequeño															Humedal Guaymaral
14	Plano	Pequeño															Ladera de cerro + Acacias
15	Plano	Pequeño															Ladera de cerro + Acacias
20	Media	Mediano															Entre potreros y autopista
21	Plano	Mediano															Entre potreros y autopista
22	Media	Pequeño															Carrilera
23	Plano	Pequeño															Escombros
26	Plano	Pequeño															Acequia + Ganado
27	Fuerte	Grande															Fabrica de ladrillos
28	Media	Pequeño															Invernaderos + Ganado
33	Media	Pequeño															Invernaderos + Ganado
34	Media	Pequeño															
35	Media	Grande															Forma de cerca viva
36	Plano	Pequeño															Urbanización
37	Plano	Pequeño															Vía secundaria + Humedal
38	Plano	Pequeño															Vía secundaria + Humedal
39	Plano	Pequeño															Ganado
40	Media	Grande															acequia + Invernaderos
47	Media	Grande															acequia + Invernaderos
49	Media	Grande															acequia + Invernaderos
51	Plano	Pequeño															Carrilera
52	Media	Pequeño															
53	Media	Pequeño															Carrilera
62	Plano	Grande															En claros de bosque de Acacia
63	Plano	Grande															En claros de bosque de Acacia
81	Media	Pequeño															

88	Media	Grande																	Acacias y Sauces + Terreno Inundable
95	Media	Grande																	Vega del río + Destapado + Carrilera
100	Media	Grande																	Vega del río + Destapado + Carrilera
103	Media	Mediano																	Carrilera
104	Media	Mediano																	Carrilera
113	Media	Mediano																	Carrilera
114	Plano	Mediano																	
119	Media	Mediano																	Acacias, Sauces y Eucaliptos + Escombros + Ganado
122	Media	Mediano																	Acacias, Sauces y Eucaliptos + Escombros + Ganado
123	Plano	Pequeño																	
124	Plano	Grande																	Carretera + Río Bogotá
174	Plano	Grande																	Acacias + Ganado
146	Plano	Pequeño																	Carretera Principal + Secundaria
148	Plano	Mediano																	Acacias + Ganado + Construcción + Escombros
160	Plano	Mediano																	Acacias + Ganado + Construcción + Escombros
171	Plano	Mediano																	Fuertemente intervenido
174	Plano	Grande																	Terreno Inundable
197	Plano	Grande																	Terreno Inundable
205	Media	Grande																	Acacias + Bodegas
227	Media	Grande																	Acacias + Bodegas
228	Plano	Grande																	Bodegas
229	Plano	Mediano																	
230	Plano	Pequeño																	Distrito de riego Ramada + Casa + Parcela
235	Plano	Pequeño																	Ganado
246	Plano	Pequeño																	Ganado
247	Plano	Pequeño																	Ganado
248	Plano	Mediano																	Invernaderos
252	Plano	Mediano																	Urbano Funza + Acacias + Inundable
253	Plano	Pequeño																	Ganado
273	Plano	Pequeño																	Suelo gredoso
289	Plano	Pequeño																	
291	Media	Pequeño																	Escombros + Acacias + Vega de río
292	Plano	Mediano																	Rodal de varios ind.

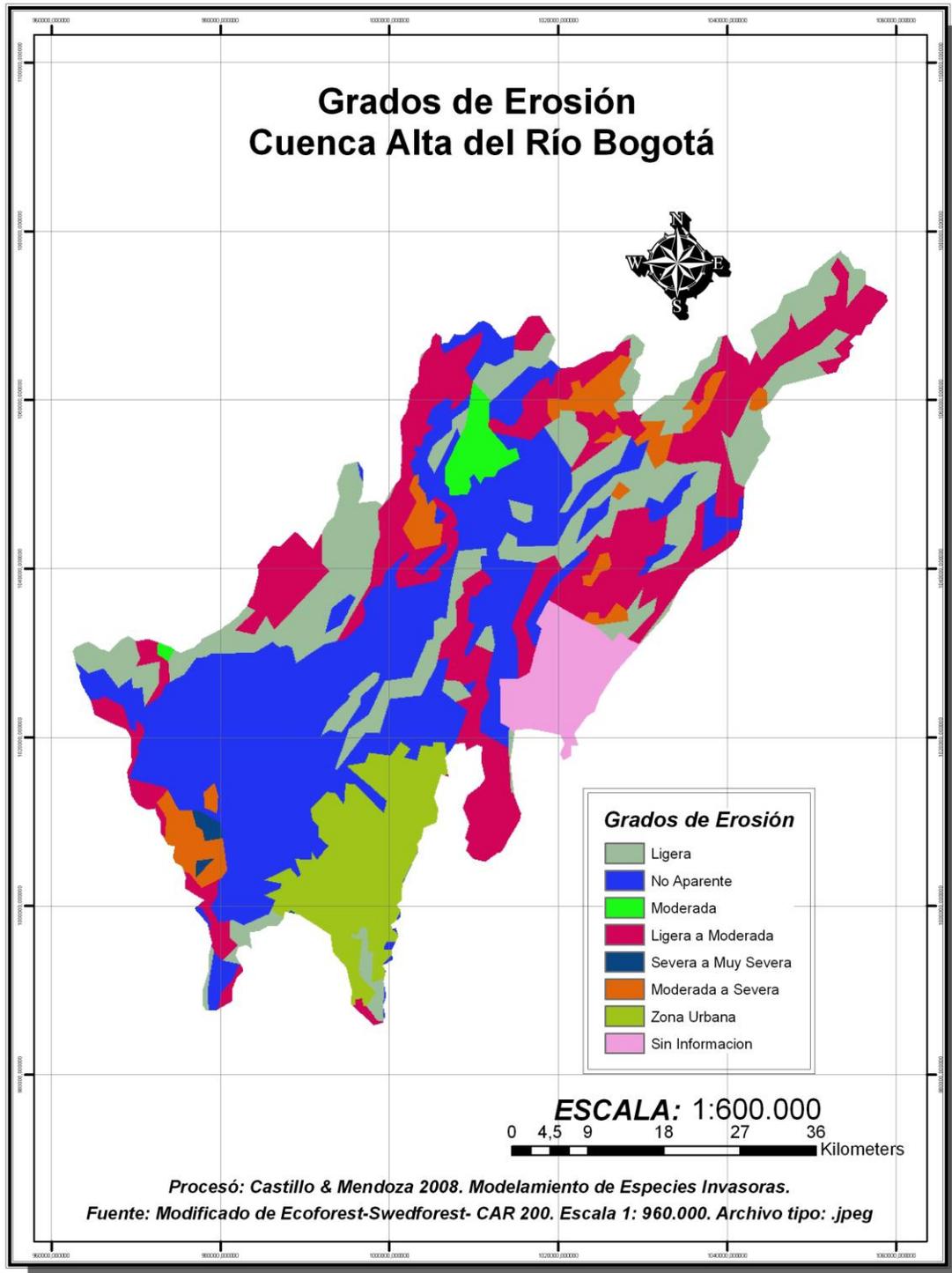




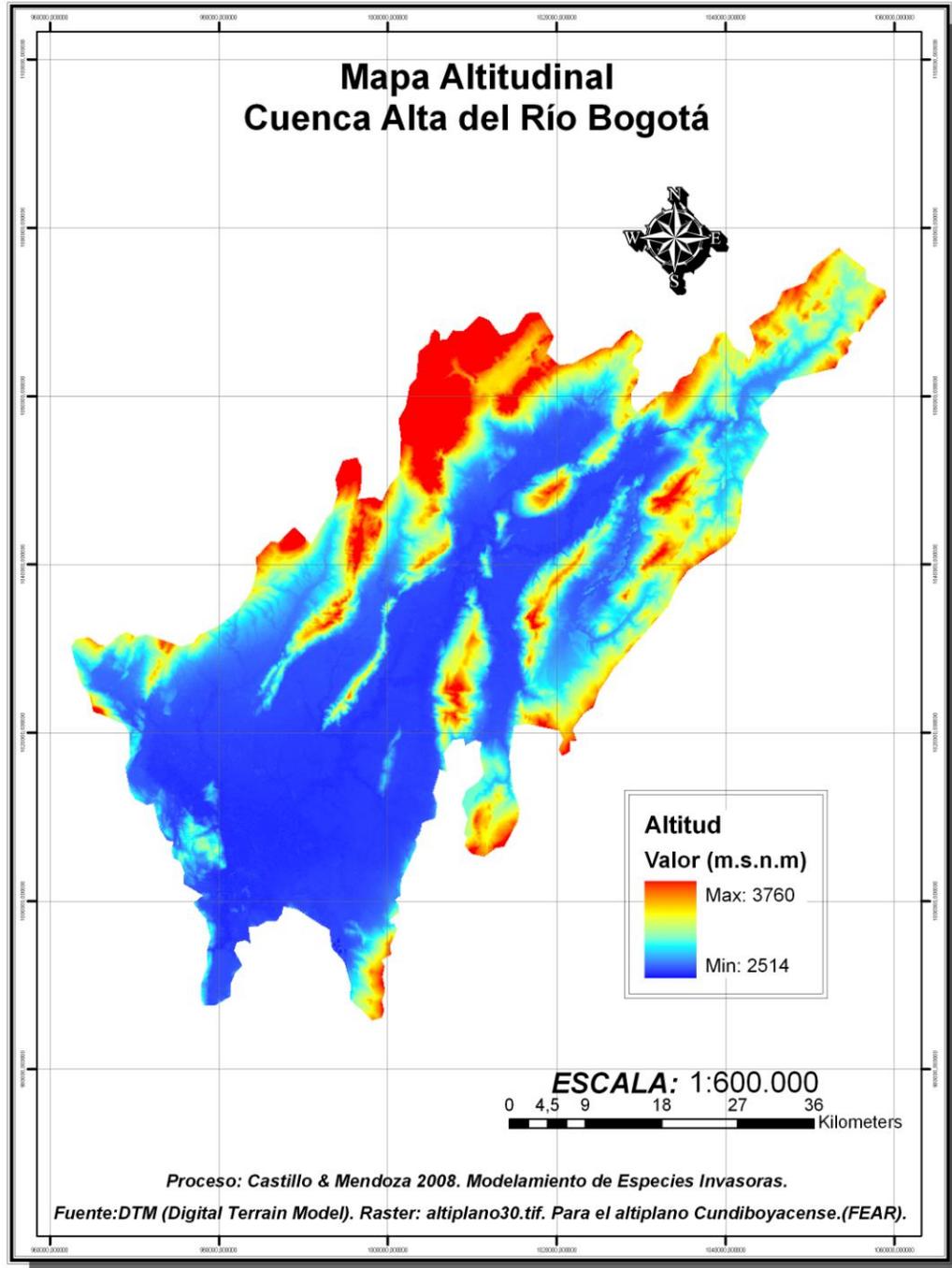




## 10.6 Mapa de Grados de Erosión



## 10.7 Mapa Altitudinal

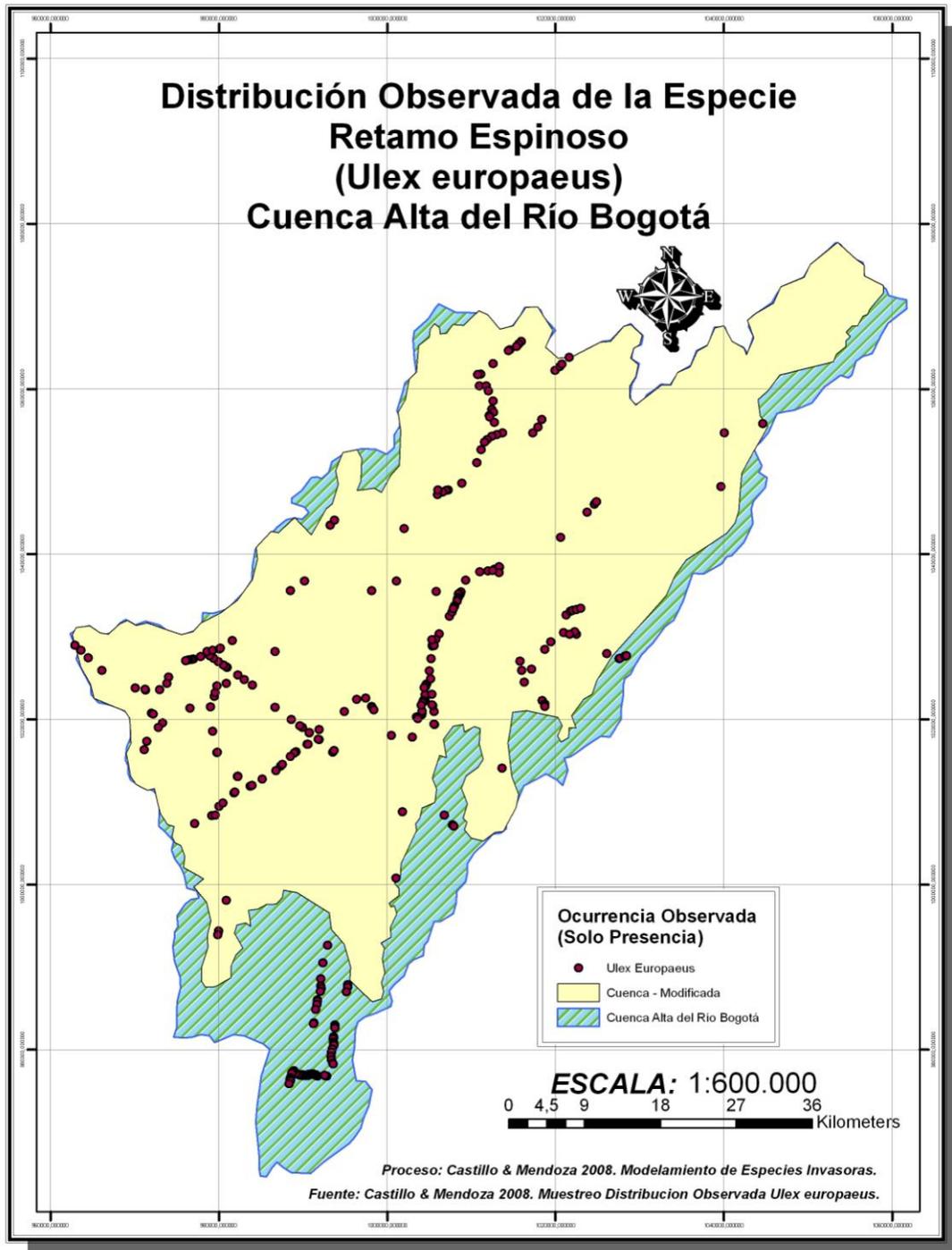


## 10.8 Tabla Soporte Teórico para las Variables Ambientales

VARIABLE	SOPORTE TEÓRICO	AUTORES CITADOS	MAPA
DISTRIBUCIÓN ACTUAL	La premisa central de este enfoque es que la distribución observada de una especie proporciona información útil en cuanto a los requisitos ambientales de la especie (Richard G. Pearson 2001) La evaluación de la distribución espacial de los organismos a través del paisaje es un elemento clave hacia la determinación de los procesos que producen patrones. (CLIFFORDE, KRAF et al ) La estrategia de utilizar la información sobre la distribución de la diversidad de especies vegetales son mucho más rentable, y reduce sustancialmente la amenaza a la diversidad de plantas nativas (STEVEN I. HIGGIN et al)	Pearson 2007; KRAF et al 2002; HIGGIN et al 1996.	Distribución Actual
PROXIMIDAD A VÍAS	El retamo se encuentra generalmente en áreas de suelos degradados como bordes de carreteras (Castro & Vanegas 2000).	Municipal con Densidad Rural	Proximidad a Vías
PROXIMIDAD A ASENTAMIENTOS	El retamo espinoso es una especie antropófica, es decir su nicho se expande con la presencia y actividad humana. La alteración del sustrato por construcción de vías, derrumbes y rellenos, genera nuevos nichos para la especie (Castro L & Vanegas V, 2000). Debido a su condición heliofílica, el retamo espinoso no coloniza lugares cubiertos por dosel sino lugares abiertos como bordes de carretera y corredores riverieños (Sanchez-Tapia 2007).		Proximidad a Cabeceeras Municipales
DENSIDAD RURAL			
EROSION	La especie prefiere áreas taladas o quemadas, zonas agrícolas y bosques abiertos, tanto naturales como plantados (Matthews 2006). El retamo frecuente áreas perturbadas por el hombre y prefiere invadir áreas de alta productividad. Al poder fijar Nitrógeno, la especie puede colonizar áreas donde nada mas crece como suelo desnudo y minas abandonadas (HEAR). La especie prefiere áreas taladas o quemadas, zonas agrícolas y bosques abiertos, tanto naturales como plantados (Matthews 2006). El retamo frecuente áreas perturbadas por el hombre y prefiere invadir áreas de alta productividad. Al poder fijar Nitrógeno, la especie puede colonizar áreas donde nada mas crece como suelo desnudo y minas abandonadas (HEAR).	Egunjobi 1971, Sanchez-Tapia & Vargas 2007. Vargas 2007, Matthews & Brandt 2006, HEAR, McNeely et al 2001, REES & HILL 2001, Higgins y Richardson, 1996, Moyle 1986, Newsome & Noble 1986 en Sakai et al 2001, Mooney et al 2001, Goodwin et al 1999.	Grados de Erosion
COBERTURA	La especie prefiere invadir pastizales, bosques abiertos y bordes de bosque. Las semillas pueden permanecer en latencia hasta que ocurran perturbaciones en el suelo, fuego o remoción del dosel, las cuales estimulan la germinación (Matthews 2006). Un estudio realizado por Egunjobi en 1971, demostró que la cantidad de hojarasca producida por el retamo espinoso es considerablemente mayor en ecosistemas simplificados y abiertos. Debido a su condición heliofílica, el retamo espinoso no coloniza lugares cubiertos por dosel sino lugares abiertos como bordes de carretera y corredores riverieños (Sanchez-Tapia 2007). La dependencia de la luz por esta especie hace que el sombreado con plantas de rápido crecimiento inhiban su desarrollo (Vargas 2007)		
ALTITUD	Su ventaja competitiva esta restringida a las partes bajas ya que el gradiente de paramización impide su expansión, principalmente por acidez, frío, heladas, resequead fisiológica y poca disponibilidad de nutrientes. Su rango altitudinal se encuentra entre 2500 y 3200 msnm, concentrado a los 2700 msnm (Castro L & Vanegas V, 2000).La distribución geográfica del retamo espinoso depende primordialmente de la temperatura, este no puede sobrevivir en climas áridos o en regiones con temperaturas extremas de frío o calor (IPM, 2000). Las plantas de retamo espinoso son especialmente sensibles al frío (Millener 1962). Un experimento realizado por Thornton 1995, demostró que la capacidad del retamo espinoso para fijar nitrógeno disminuye durante el invierno, sugiriendo que las bajas temperaturas disminuyen la ventaja competitiva de la especie. Según Castro L & Vanegas V, 2000, la humedad atmosférica alta y constante a lo largo del año favorece a la especie.	Castro & Vanegas 2000, ISSG, Millener 1962, Thornton 1995	Altitudinal
PENDIENTE	El retamo crece bien en endientes moderadas con alta humedad edáfica y buen drenaje (IPM 2000 en ISSG). La especie no compete bien ni en las altas laderas ni en los planos bajos (inundables), el problema se concentra en el pie de las laderas, colinas y fondos de valle de pendiente moderada (Castro L & Vanegas V, 2000) Según Castro L & Vanegas V, 2000, la especie compete bien en pendientes moderadas, pero su mayor capacidad invasiva se ve en zonas planas de drenaje más lento.		

SUELO	<p>La capacidad del retamo espinoso para fijar nitrógeno, le permite colonizar áreas de suelos pobres, puede desarrollarse en cualquier tipo de suelo incluyendo suelos ácidos con menos del 4% de materia orgánica (Zabkiewicz 1976; Hoshovsky 1986. In IPM, 2000). (ISSG).</p> <p>El retamo no es una especie amiga de los limos y prefiere suelos con un pH de 4 a 5 (este pH también es favorable para las bacterias fijadoras de nitrógeno ubicadas en sus nódulos). Esta especie no está confinada a ningún tipo de suelo en particular, puede encontrarse en suelos ligeros y arenosos o en suelos arcillosos y pesados (HEAR).</p> <p>El crecimiento óptimo de la especie se da en suelos con pH entre 4.5 y 5. Invade rápidamente suelos de baja fertilidad y abundante humedad edáfica (ISSG).</p> <p>Según Castro L &amp; Vanegas V, 2000, la especie busca suelos de poca estructura y drenaje deficiente, sin ser higromórficos. Suelos ricos alfisoles y molisoles de pie de ladera.</p>	Zabkiewicz 1976; Hoshovsky 1986 In ISSG, HEAR, Castro & Vanegas , 2000.	Suelos
PROXIMIDAD A RIOS	<p>Según HEAR, el retamo se encuentra también a lo largo de los cursos de agua y pantanos. La especie coloniza los bancos de los ríos (Matthews 2006).</p> <p>Esta especie no está confinada a ningún tipo de suelo en particular, puede encontrarse en suelos ligeros y arenosos o en suelos arcillosos y pesados, permitiéndole colonizar desde bancos de ríos hasta bosques de dosel abierto. (HEAR).</p> <p>Además una de las estrategias de dispersión de la especie es a través de las corrientes de agua (Hoshovsky, 1989 en ISSG). Debido a su condición heliofílica, el retamo espinoso no coloniza lugares cubiertos por dosel sino lugares abiertos como bordes de carretera y comedores rivereños (Sanchez-Tapia 2007)</p>	Matthews & Brandt 2006, HEAR, Hoshovsky, 1989 en ISSG. Sanchez-Tapia & Vargas 2007.	Proximidad a Rios
CLIMA	<p>El <i>Ulex europaeus</i>, prefiere un clima benigno (dentro de los parámetros altoandinos), prácticamente exento de heladas y sequías (Castro L &amp; Vanegas V, 2000). Cambios en el clima pueden generar condiciones favorables para el establecimiento de especies invasoras, al igual que disminuir la viabilidad e interacciones de las especies nativas (GISP 2004). La falta de adaptación a un nuevo clima, junto con la competencia, la perturbación y la enfermedad, son consideradas razones para la no viabilidad de la invasión biológica (Lodge 1993, Moyle 1986, Newsome &amp; Noble 1986).</p>	Castro & Vanegas 2000; GISP 2004; Richardson & Pys'ek 2006	Zonificación Climática Caldas-Lang
PRECIPITACIÓN	<p>Según Boyd 1984 en ISSG, el retamo compete mejor donde la oferta hídrica es alta, sin embargo Zabkiewicz 1976 afirma que esta prefiere áreas de buen drenaje.</p> <p>El retamo cuenta con una serie de nódulos, ubicados en sus raíces donde alberga bacterias fijadoras de nitrógeno, estas bacterias trabajan más eficientemente bajo condiciones aeróbicas, si las raíces se ven inundadas, el metabolismo de estas bacterias se hace más lento (Zabkiewicz 1976, in Hoshovsky, 1989) (ISSG).</p> <p>La presencia de sequías limita la competitividad de la especie (Castro L &amp; Vanegas V, 2000).</p>	Boyd 1984 en ISSG, Castro & Vanegas 2000.	Distribución Espacial de la Precipitación
EVAPOTRANSPIRACION			Evapotranspiración Potencial Método de Hargreaves
ARIDEZ	<p>El retamo espinoso necesita de una humedad atmosférica alta y relativamente constante a través del año. También es importante una humedad constante en el suelo, exento de sequías (Castro L &amp; Vanegas V, 2000). Invade áreas secas y perturbadas, como bosques talados o pastizales excesivamente pastados (Scott 2005).</p>	Castro & Vanegas 2000; Scott 2005	Índice de Aridez de Martonne
RADIACION SOLAR	<p>El retamo espinoso es una especie estrictamente heliofílica (no soporta el sombreado en lo más mínimo) (Castro L &amp; Vanegas V, 2000). Las plántulas de <i>Ulex europaeus</i> que crecen en fotoperíodos de 16 horas son más altas, robustas y espinosas que las que se desarrollan en fotoperíodos más cortos (8 horas). La duración del fotoperíodo afecta en mayor medida el crecimiento de los juveniles. La intensidad lumínica baja, demora la formación de las espinas en <i>U. europaeus</i> (Bieniek &amp; Millington 1988).</p>	Castro & Vanegas 2000; Bieniek & Millington 1988	Radiación Solar Media Anual

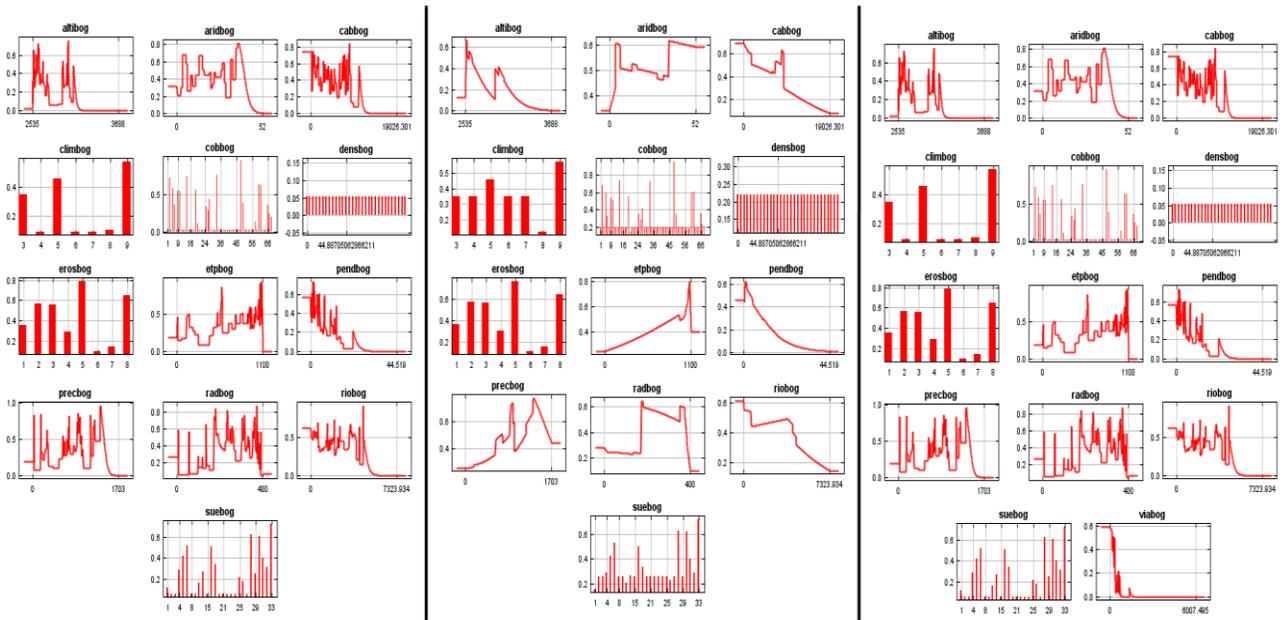
## 10.9 Mapa Modificación del Área de Estudio



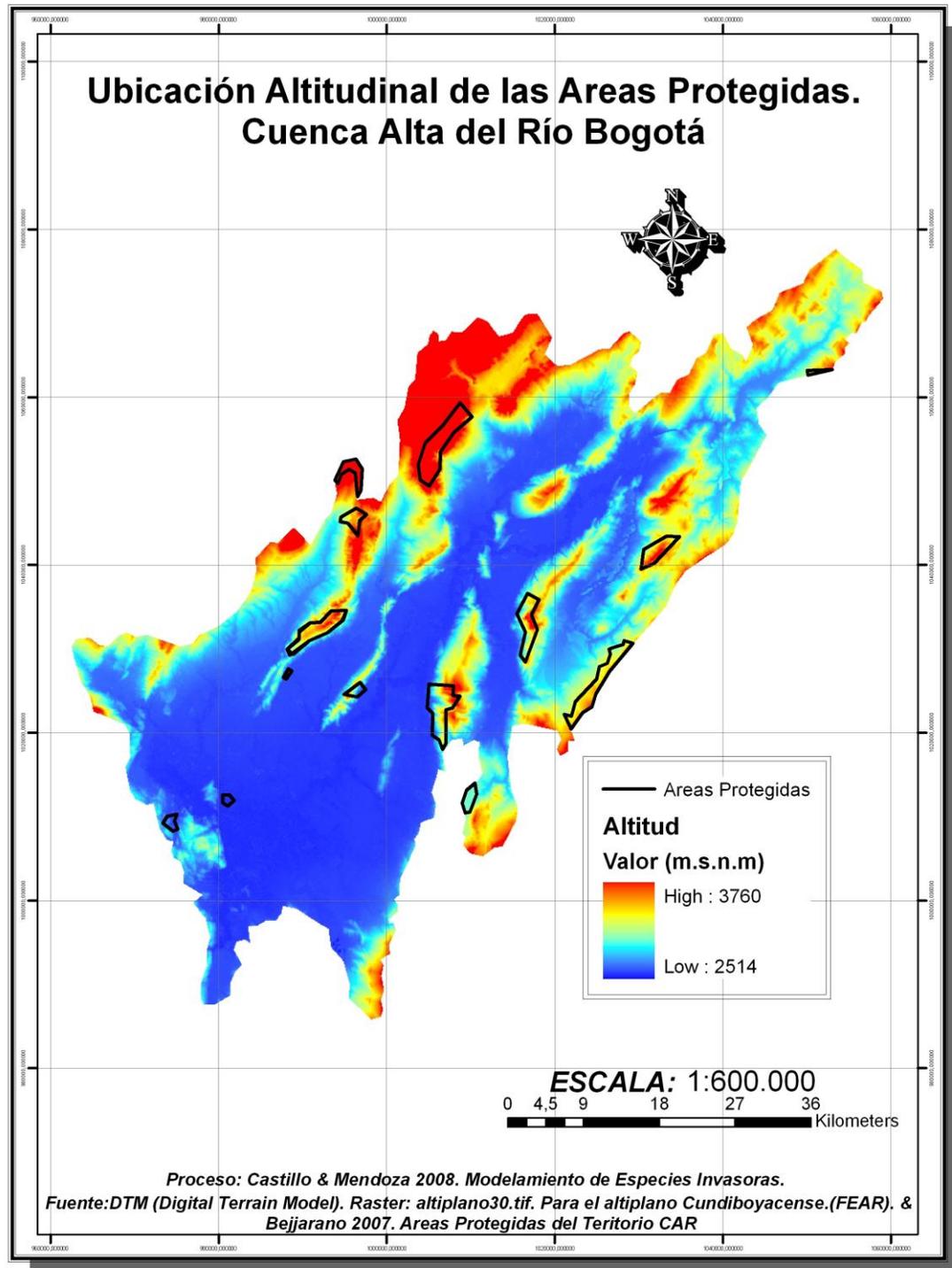
## 10.10 Tabla Repeticiones de MAXENT

Numero de Repeticiones en Maxent 3.2.1 <sup>®</sup>	Capa biológica (Muestreo)	Con todas las capas ambientales	Sin Capa de Proximidad a Vías	Random Test Percentage (25)	Regulization Multiplier			Maximum Iterations	
					1	0,1	0,01	500	1000
1	*	*		*	*			*	
2	*		*	*	*			*	
3	*	*		*			*	*	
4	*		*	*			*	*	
5	*	*		*			*	*	*
6	*		*	*			*	*	*
7	*	*		*		*		*	*
8	*		*	*		*		*	*
9	*	*		*	*			*	*
10	*		*	*	*			*	*

## 10.11 Curvas de Respuesta Marginales



## 10.12. Ubicación Altitudinal de las Áreas Protegidas



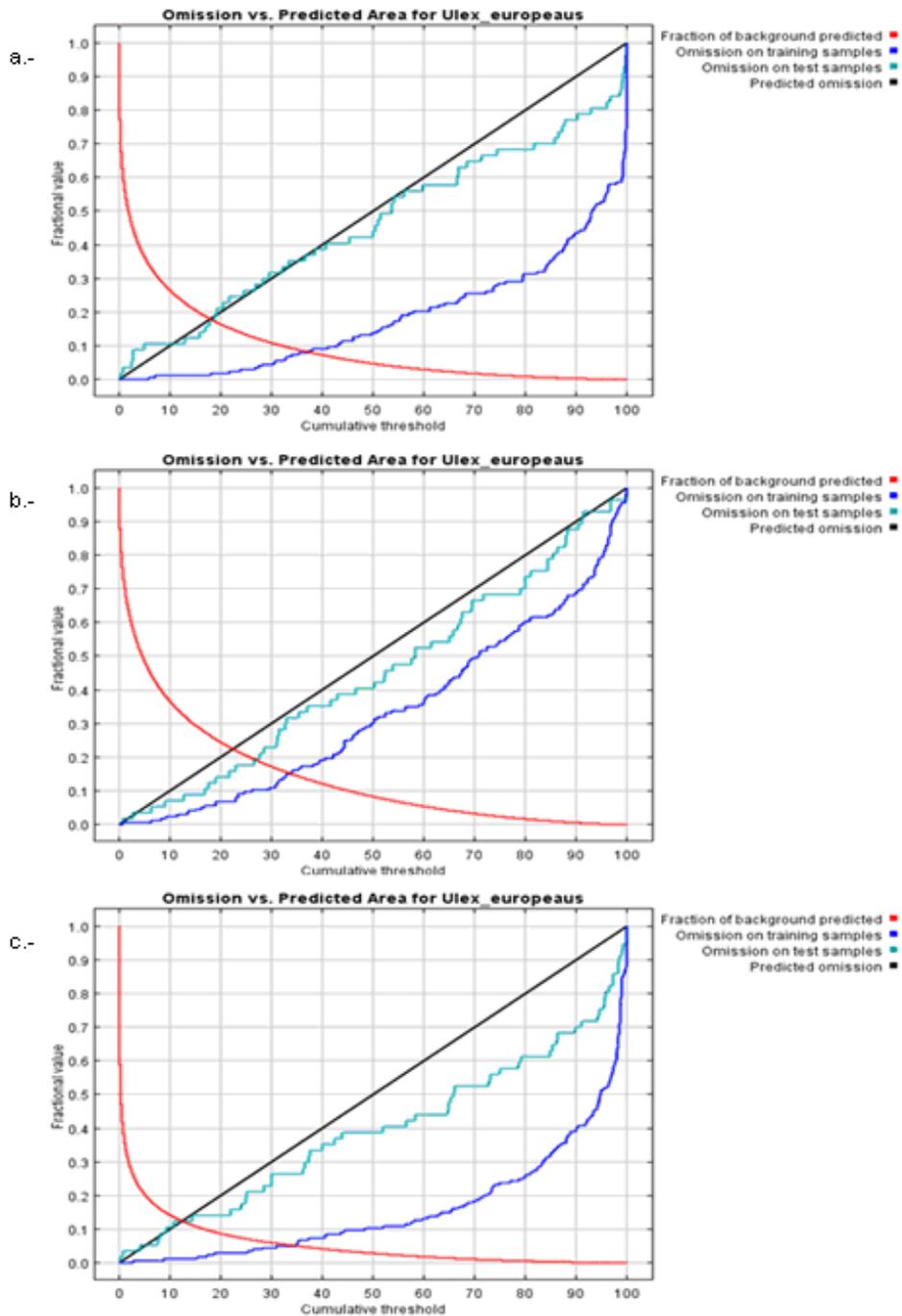
## 10.13 Parámetros y valores para modelos MAXENT

Parámetros y valores para modelos MAXENT. a.- Ajuste 0.1. Sin prox. a vías. b.- Ajuste 1. Sin prox. a vías. c.- Ajuste 0.1. Todas las capas.

a.-	AUC para Datos de Prueba:	0.894
	AUC para Datos de Entrenamiento:	0.979
	"Random Test Percentage":	25
	Datos de Entrenamiento:	172
	Datos de Prueba:	57
	Variables Mambientales Utilizadas:	13. cobertura vegetal, aridez, densidad rural, evapotranspiración, precipitación, radiación solar, altitud, pendiente, tipología del suelo, erosión, clima, proximidad a ríos, proximidad a cabeceras.
	"Regularization Multiplier":	0.1
	Formato de Salida:	Logistico
	"Maximum Iterations":	1000
b.-	AUC para Datos de Prueba:	0.883
	AUC para Datos de Entrenamiento:	0.929
	"Random Test Percentage":	25
	Datos de Entrenamiento:	172
	Datos de Prueba:	57
	Variables Mambientales Utilizadas:	13. cobertura vegetal, aridez, densidad rural, evapotranspiración, precipitación, radiación solar, altitud, pendiente, tipología del suelo, erosión, clima, proximidad a ríos, proximidad a cabeceras.
	"Regularization Multiplier":	1
	Formato de Salida:	Logistico
	"Maximum Iterations":	1000
c.-	AUC para Datos de Prueba:	0.950
	AUC para Datos de Entrenamiento:	0.989
	"Random Test Percentage":	25
	Datos de Entrenamiento:	172
	Datos de Prueba:	57
	Variables Mambientales Utilizadas:	14. cobertura vegetal, aridez, densidad rural, evapotranspiración, precipitación, radiación solar, altitud, pendiente, tipología del suelo, erosión, clima, proximidad a ríos, proximidad a cabeceras <i>y proximidad a vías.</i>
	"Regularization Multiplier":	0.1
	Formato de Salida:	Logistico
	"Maximum Iterations":	1000

### 10.14 Curva de la tasa de omisión y área predicha

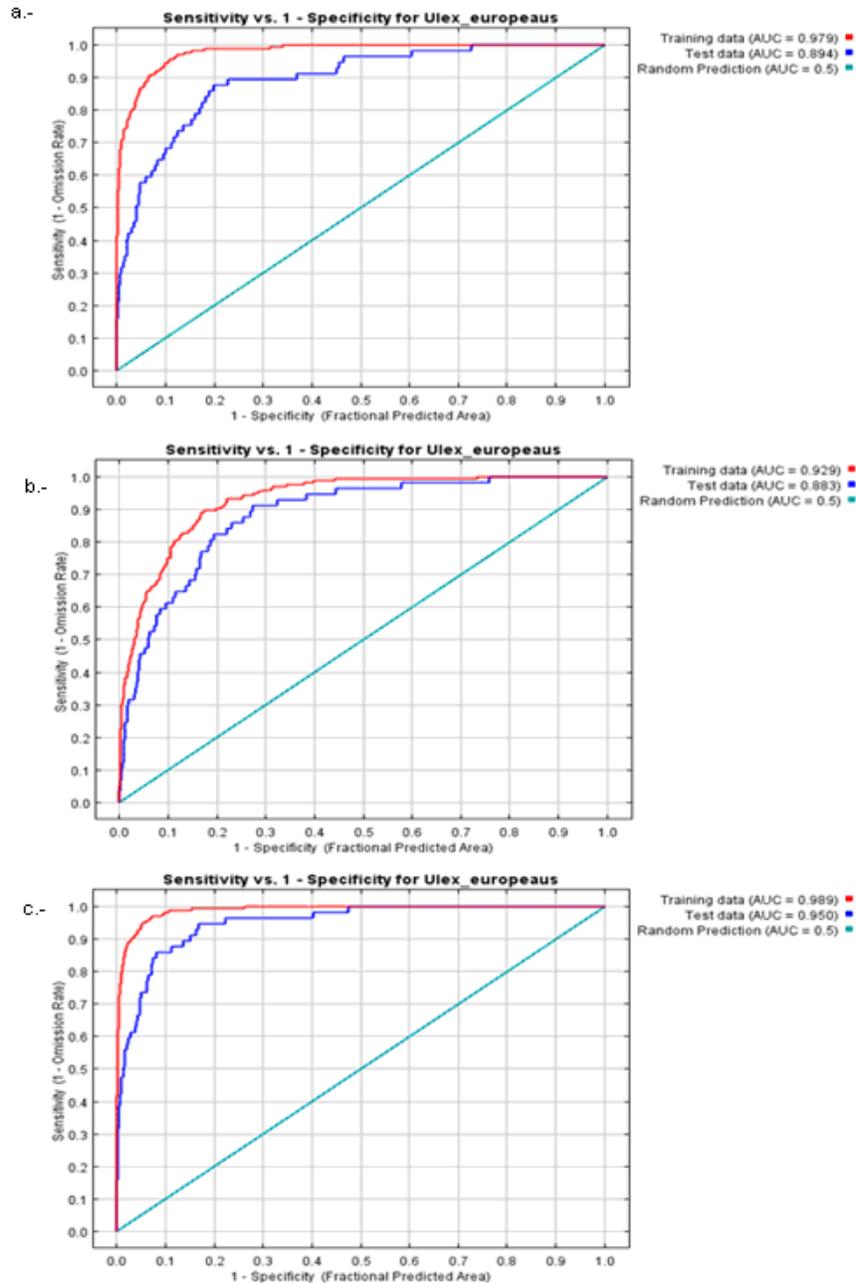
La siguiente gráfica muestra la tasa de omisión y área predicha como función del umbral cumulativo. La tasa de omisión es calculada tanto como para los registros de presencia de entrenamiento, como para los datos de prueba.



Curva de tasa de omisión y área predicha. a.- Ajuste 0.1. Sin prox. a vías. b.- Ajuste 1. Sin prox. a vías. c.- Ajuste 0.1. Todas las capas.

## 10.15 Curva ROC

La siguiente es la Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), realizada para los datos de prueba (azul oscuro) y de entrenamiento (rojo). La línea azul clara muestra una predicción aleatoria.



Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) . a.- Ajuste 0.1. Sin prox. a vías. b.- Ajuste 1. Sin prox. a vías. c.- Ajuste 0.1. Todas las capas.