

# MEJORA DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LAS AREAS PROTEGIDAS EN UN PUNTO CALIENTE DE BIODIVERSIDAD: EL CASO DE VERTEBRADOS AMENAZADOS EN COLOMBIA

Lillan Andrea Cendales Rojas

Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya

Director:

Virgilio Hermoso López  
Centre de Ciència i  
Tecnología Forestal de  
Catalunya/ Presa de  
decisiones ambientals

Directora:

Alejandra Morán Ordoñez  
Centre de Ciència i  
Tecnología Forestal de  
Catalunya/ Biodiversitat i  
ecologia del paisatge

Màster de Biodiversitat

Octubre 21 de 2019



# MEJORA DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LAS ÁREAS PROTEGIDAS EN UN PUNTO CALIENTE DE BIODIVERSIDAD: EL CASO DE VERTEBRADOS AMENAZADOS EN COLOMBIA

Lillan Andrea Cendales Rojas

Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya

Màster de Biodiversitat, Octubre 21 de 2019

Estudiant:  
Lillan Andrea  
Cendales Rojas

Director:  
Virgilio Hermoso López  
CTFC/ Presa de decisions  
ambientals

Directora:  
Alejandra Morán Ordoñez  
CTFC / Biodiversitat i  
ecologia del paisatge

## Abstract

Colombia is home to one of every 10 species of flora and fauna in the world, but also there is low representation of species within its protected areas. Here, we applied systematic conservation planning to identify the gaps in the network of protected areas and to identify potential areas for conservation in continental Colombia, with the aim of presenting some solutions to increase the representation of threatened species of terrestrial vertebrates in the network of protected areas. We use the spatial distribution of 240 terrestrial vertebrate species (amphibians, birds, terrestrial mammals and reptiles) threatened, enlisted by 1912/2017 National resolution of Colombia. We use Marxan to identify a minimum set of additional areas that would help to represent all threatened species included in the study and to account for key ecological processes derived from connectivity. We found that 55 species do not have any representativity in the network and 99 of them have only the 10% of their distribution inside it. Most of the newly proposed areas are located in the Andean region, a region with large conservation gaps and irreversible changes in land use. Our study will help to guide future revisions of the design of SINAP, while providing a framework to address deficiencies in reserve networks for more adequately protecting threatened species of terrestrial vertebrates.

“La única manera de superar el riesgo de extinción es mediante un activo proceso de aprendizajes sociales que haga que todos los sectores asuman una parte de la compleja responsabilidad que significa proteger todas las formas de vida del país, una décima parte mal contada de las planetarias”

Brigitte Baptiste

## Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
2. Materiales y Métodos.....	3
Área de estudio .....	3
Distribución de especies, áreas protegidas y grado de humanización.....	3
Análisis de los datos.....	5
Representatividad de las áreas protegidas frente a la cobertura de distribución de especies amenazadas (Gap Analysis) .....	5
Identificación de áreas prioritarias para la conservación de especies de vertebrados amenazados en Colombia.....	6
Análisis de las regiones de nuevas zonas a conservar .....	8
3. Resultados.....	9
Análisis de representatividad del SINAP (Gap Analysis) .....	9
Identificación de áreas prioritarias para la conservación de especies de vertebrados terrestres amenazados en Colombia.....	10
4. Discusión .....	13
5. Conclusiones .....	15
6. Bibliografía.....	16



## 1. Introducción

El declive de la diversidad de especies y ecosistemas es más rápido ahora que en cualquier otro momento de la historia humana: actualmente alrededor de un millón de especies enfrentan el riesgo de la extinción (IPBES, 2019). Los objetivos socio-ambientales internacionales como los que se recogen en las Metas de Aichi para la Diversidad Biológica (e.g. target 11: conservación del 17% las zonas terrestres y de las aguas interiores y el 10% de las zonas marinas y costeras para 2020) y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (e.g. objetivo 15. Vida de los ecosistemas terrestres) (United Nations, 2018a), el Acuerdo de París sobre cambio climático (UNFCC, 2016) y la visión 2050 para la biodiversidad (CBD, 2017), no se alcanzarán si no se gestionan y ponen límites a los factores antropogénicos que afectan al planeta (IPBES, 2019).

De esta manera, se hace urgente y necesario implementar acciones para luchar contra la pérdida de especies. La creación, gestión y expansión de áreas protegidas (PAs), son una de las estrategias principales que se utilizan para detener la pérdida de biodiversidad y para alcanzar objetivos de conservación en zonas donde la presión antropogénica genera rápidos cambios en el uso del suelo (Hermoso et al., 2016, Possingham, et al., 2014, Rodríguez et al., 2013). Sin embargo, aunque las redes de áreas protegidas suelen ser un indicador de progreso de la conservación de biodiversidad, los esfuerzos y recursos invertidos pueden no ser suficientes para reducir la presión sobre los ecosistemas, pues la biodiversidad continúa declinando mientras que las amenazas a ella están siempre aumentando (Cabeza, 2013). Varios estudios han evaluado la funcionalidad de las áreas protegidas sobre la cobertura de especies amenazadas, demostrando que no se tiene una buena representación de estas especies dentro de los espacios protegidos (Choe et al., 2018; Fonseca and Venticinque, 2018; Fajardo et al., 2014 ;Sriharan, 2009). Esto evidencia una clara necesidad de aumentar la efectividad de las áreas protegidas frente a la amenazas (Bruner et al., 2001), haciendo hincapié en que la sola creación de áreas protegidas no es suficiente para proteger la biodiversidad. Para que exista un cambio transformador, se requiere además monitorear la efectividad de las medidas implementadas, así como potenciar medidas de conservación específicas dentro de estas extensiones de espacios protegidos y proveer desde la gobernanza un manejo adecuado a cada una de ellas (IPBES, 2019).

Dados los altos costes de conservación, la necesidad de uso eficiente de los recursos, y los conflictos socio-económicos entre la conservación y otros usos legítimos del territorio, es necesaria la planificación estratégica de las áreas protegidas, ya que, si los esfuerzos de conservación se aplicaran en pocas áreas pero estas fueran claves para el mantenimiento de los procesos ecológicos, sería posible conservar especies clave con mucha más eficiencia (Dobson et al., 1997). En aras de alcanzar estos objetivos, la planificación de la conservación no debe tratar solamente de la ubicación de las reservas en relación a patrones naturales físicos y biológicos; también debe incluir un diseño inteligente que tenga en consideración otros aspectos como la conectividad entre espacios protegidos y su tamaño, generando así un diseño más

compacto y mayor conexión entre las áreas de protección, facilitando así las conexiones ecológicas (Worboys et al., 2016).

La ordenación del territorio mediante la planificación sistemática de la conservación es considerada como una metodología robusta que se emplea para la selección de áreas para preservar la biodiversidad. Esta tiene como objetivo seleccionar el área mínima que garantice que la biodiversidad, así como los procesos que la sustentan, persistan en el tiempo (Margules and Pressey, 2000). La planificación sistemática de áreas protegidas es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que puede orientar a los gobiernos en el diseño de sus sistemas de áreas de protección, que permita una conservación efectiva de la biodiversidad (Herrera and Finegan, 2008).

Colombia es un país megadiverso, contando con aproximadamente el 10% de la biodiversidad global (Arbeláez-Cortés, 2013). Por ende, es fundamental emprender acciones que contribuyan a la conservación de su biodiversidad (Forero-Medina and Joppa, 2010). Colombia tiene el compromiso de implementar políticas y esquemas de desarrollo para la conservación de la biodiversidad a nivel global y contribuir de manera eficaz al cumplimiento de los objetivos de los diferentes convenios internacionales en los que participa, entre los cuales se incluye el Convenio de Diversidad Biológica (CBD, 2010). Por tal motivo, debe establecer y mantener un sistema nacional y regional de áreas protegidas completo, eficazmente gestionado, y ecológicamente representativo (PNNC, 2019).

La biodiversidad colombiana actualmente enfrenta amenazas como la pérdida de hábitats naturales en consecuencia de actividades como la agricultura y la ganadería extensiva, el cambio climático, la deforestación, los cultivos ilícitos, la minería ilegal, la sobreexplotación de especies silvestres, la contaminación, y la expansión rural y urbana, entre otros (Díaz and Duffy, 2006). Es por este motivo que se hace necesario reevaluar las medidas implementadas frente a la pérdida de biodiversidad. Una de las cuestiones más importantes es estimar si el sistema de áreas protegidas del país está protegiendo de forma eficaz a las especies que están catalogadas como amenazadas, o si por el contrario, no cubre suficientemente la distribución de estas especies, que deberían tener prioridad de conservación sobre otras.

Actualmente Colombia cuenta con un sistema de áreas protegidas (SINAP) que incluye zonas de gobernanza pública, privada o comunitaria, y del ámbito de gestión nacional, regional o local (PNNC, 2019). El SINAP está conformado por 1.130 áreas protegidas (incluyendo las reservas naturales de la sociedad civil), que ocupan una superficie de 310.000 km<sup>2</sup>, equivalentes al 15 % del territorio nacional, los cuales están distribuidos en: 185.642 km<sup>2</sup> terrestres, equivalentes al 16% de la superficie terrestre del país y 12.800 km<sup>2</sup> marinos, 14% de la superficie marina de la nación (RUNAP, 2018). Aunque el SINAP es una de las estrategias de conservación y preservación de los recursos más importantes que tiene Colombia, el informe de biodiversidad anual del 2016 destaca que esta estrategia no está dando los resultados esperados (Moreno et al, 2017). Una de las razones que puede explicar estos resultados, es que la selección de áreas protegidas en Colombia ha obedecido principalmente a factores como la protección de tierras para conservación del agua, protección de grupos carismáticos de fauna y flora o algunas especies insignia, protección de algunas

reservas forestales, conservación de ecosistemas con leyes de protección especiales como páramos y humedales, protección de zonas sagradas indígenas, territorios afrocolombianos y reservas campesinas, protección de áreas de pesca no industriales, protección de plantas medicinales y conservación de algunas zonas que se encuentran en recuperación (Matallana, 2018; SINAP\_PNNC, 2017).

En consideración de lo anterior, este trabajo plantea en concreto dos objetivos: 1) Evaluar la representación de vertebrados terrestres amenazados listados en la Resolución 1912 de 2017 del Gobierno de Colombia, en la red actual de espacios protegidos (SINAP), y 2) Identificar áreas prioritarias que permitan aumentar la representatividad de las especies y la conectividad existente entre la red actual.

## **2. Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

Con una superficie total de aprox. 2 Mkm<sup>2</sup>, Colombia está localizado en la región noroccidental de América del Sur, con costa en el océano Pacífico y acceso al Atlántico a través del mar Caribe (Figura 1). Su territorio está dividido en 32 departamentos los cuales se contienen en 6 grandes regiones naturales denominadas: Región Andina, Región Pacífica, Orinoquía, Región Insular, Región Caribe y Región Amazónica (IGAC, 2002).

El área de estudio es la porción de tierra continental que pertenece a Colombia, con una extensión de 1,1 MKm<sup>2</sup> situados a lo largo de un gradiente altitudinal lo que genera una gran diversidad climática en todo el país (Sánchez-Cuervo et al., 2012). También presenta grandes diferencias en precipitaciones anuales según la zona, estando en un rango desde 350 mm hasta 12.000 mm. Los tipos de usos del suelo se enmarcan en vocación agrícola, agroforestal, ganadera, forestal, y de conservación (IAvH, 2017 & Malagón, 2002).

### **Distribución de especies, áreas protegidas y grado de humanización.**

De un total de 281 especies de vertebrados terrestres listados por el gobierno colombiano como amenazados, se logró recopilar información acerca de la distribución espacial de 240 especies (128 aves, 42 anfibios, 41 de reptiles y 29 de mamíferos terrestres). Todos ellos están listados en la Resolución 1912 del 15 de Septiembre de 2017 *“Por la cual se establece el listado de especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana continental y marino costera que se encuentran en el territorio nacional, y se dictan otras disposiciones”* (Res. 1912, 2017). Esta norma colombiana contempla 3 categorías de amenaza para las especies, 1. Peligro Crítico (CR): aquellas especies que están enfrentando riesgo de extinción extremadamente alto en vida silvestre; 2. En Peligro (EN): aquellas especies que enfrentan riesgo de extinción muy alto en vida silvestre; 3. Vulnerable (VU): aquellas especies que enfrentan un riesgo de extinción alto en vida silvestre.



La distribución espacial de las especies en Colombia fue obtenida de la página de recursos cartográficos de la IUCN en el caso de mamíferos terrestres, anfibios y reptiles (IUCN, 2019) (<https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download>), mientras que los mapas de distribución de las aves fueron obtenidos de BirdLife Internacional (BirdLife International and NatureServe, 2015) (<http://datazone.birdlife.org/home>). Los mapas de distribución consisten en polígonos que representan una estimación de la distribución potencial de la especie en una determinada zona. En cuanto a las distribuciones utilizadas, se tuvo en cuenta solamente los polígonos donde las especies son consideradas nativas (origen=1, según la clasificación de la IUCN) y las que solamente representan distribuciones actuales (presencia=1, según la clasificación de la IUCN).

Utilizando el software ArcGIS 10.6.1 (Environmental Systems Research Institute - ESRI, 2011) se generó una malla regular de 10x10 km a lo largo de la porción continental de Colombia, originando así un total de 13.852 unidades de estudio. La información de la distribución de las especies en estudio se trasladó a esta malla regular. Se asumió que las especies estaban presentes en una cuadrícula (10x10 km) cuando el polígono de la IUCN tocara en al menos un punto la misma.

La misma malla de cuadrículas del territorio colombiano, se solapó con el mapa del Sistema de áreas Protegidas de Colombia (SINAP), el cual se extrajo de la página de datos abiertos al ciudadano de los Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC, 2013) (<http://www.parquesnacionales.gov.co>). Esta cartografía contiene 643 espacios protegidos y no contempla las reservas de la sociedad civil. Se asumió que una cuadrícula (10x10 Km) se encontraba suficientemente cubierta por espacios protegidos solamente cuando el polígono de la SINAP cubriera una superficie de la cuadrícula mayor al 75% de la misma.

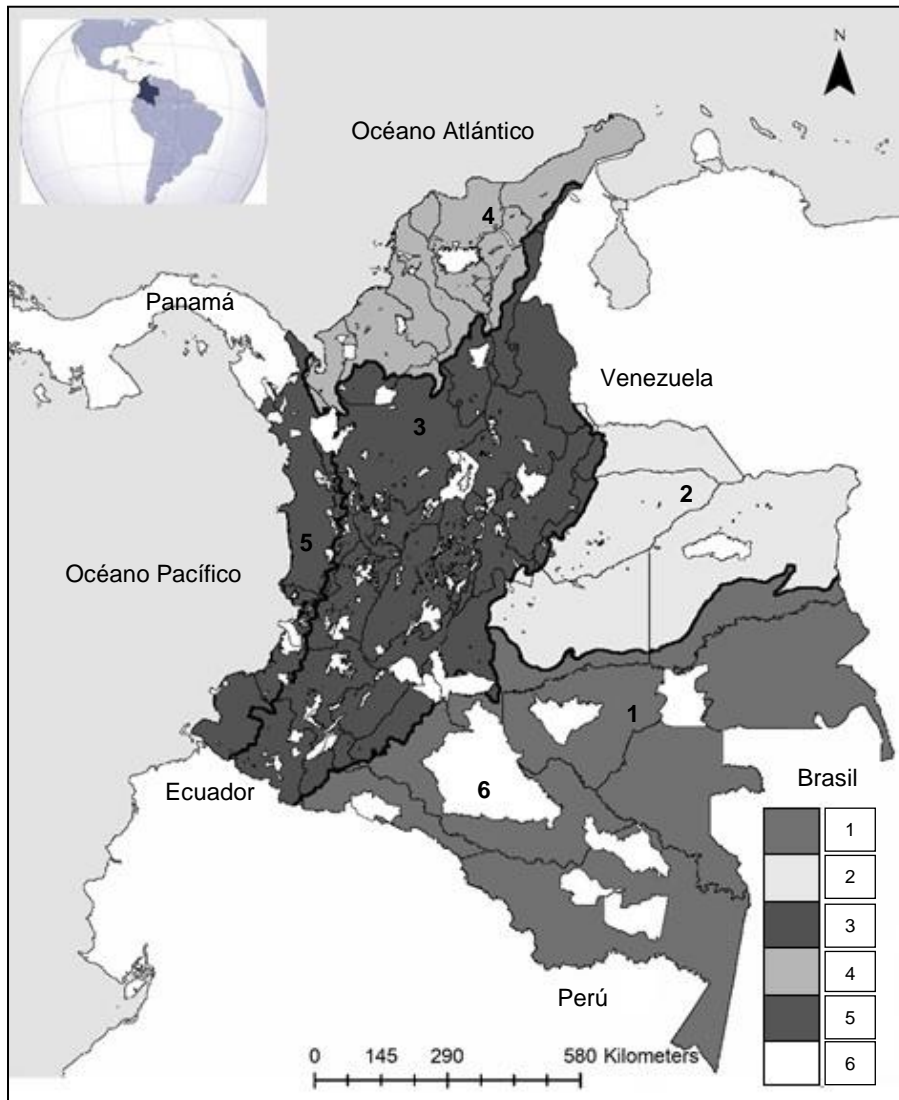


Figura 1. Área de estudio: Colombia Continental. 1. Región Amazónica, 2. Región Orinoquía, 3. Región Andina, 4. Región Caribe, 5. Región Pacífica y 6. En blanco: Distribución de Áreas Protegidas de Colombia-SINAP.

## Análisis de los datos

### Representatividad de las áreas protegidas frente a la cobertura de distribución de especies amenazadas (Gap Analysis)

Para estimar la representatividad actual de las especies de vertebrados terrestres amenazadas en Colombia dentro de la red de espacios protegidos actual del SINAP, se solaparon los mapas de distribución de cada especie con los mapas de áreas SINAP y se calculó el porcentaje de distribución total de cada especie dentro de la porción de espacios protegidos.

## Identificación de áreas prioritarias para la conservación de especies de vertebrados amenazados en Colombia

Para la identificación de áreas de especial interés de conservación en Colombia por albergar especies amenazadas de los grupos aquí estudiados, se utilizó el software Marxan (Ball et al. 2009). Esta herramienta de optimización espacial utiliza un algoritmo (Simulated Annealing algorithm) para encontrar la combinación más óptima de unidades de planificación (cuadrículas 10 x10 km en este caso) que consiga las metas o targets propuestos para cada elemento de conservación (cada especie de vertebrado amenazado en Colombia en este caso). La solución espacial de la optimización busca representar el mayor número de especies amenazadas en el área de menor tamaño posible, lo que minimiza el coste de la solución (Ardrón et al., 2010). Adicionalmente, tiene en cuenta la conectividad entre las unidades de planificación, lo que incrementa la conectividad entre las áreas protegidas (Hermoso et al., 2013).

A cada solución del diseño de reserva se le asigna un valor de función objetivo, que es la que optimiza Marxan: una solución con un valor bajo es más óptima que una con un valor alto (Ardrón et al., 2010). En esta minimización de la función objetivo, Marxan tiene en cuenta tres parámetros: 1: el coste asociado a las unidades de planificación de la solución; 2: las penalizaciones por no alcanzar las metas de las unidades de conservación (especies amenazadas); 3: las penalizaciones de conectividad por las conexiones que no se dan entre las áreas protegidas, reduciendo así los niveles de fragmentación (Hermoso et al., 2018a). Para este ejercicio, se estableció que Marxan corriera el algoritmo de optimización 100 veces, con 100 iteraciones cada una. De entre todas las soluciones obtenidas de esas 100 búsquedas, se seleccionó la mejor de ellas (aquella con el menor valor de la función de objetivos).

*Ecuación 1. Función Objetivo de Marxan (donde: Cost=coste, PUs=unidades de planificación, SPF=Factor de penalidad de especies, features=elementos de conservación o especies a ser protegidas, BLM=Boundary Length Modifier, Boundary=Frontera).*

**FUNCIÓN OBJETIVO =**

$$\sum_{PUs} cost + \sum_{features} SPF * Feature Penalty + BLM \sum_{PUs} boundary penalty$$

Dada la dificultad de estimar el coste monetario exacto que supondría gestionar las especies protegidas en una determinada unidad de planificación, se utilizó el grado de humanización para cada una de estas (Human Footprint Index: Venter et al., 2016) (<https://wcshumanfootprint.org/>) como subrogado de coste. Este mapa mide el impacto acumulativo de las presiones que generan las actividades antropogénicas sobre la naturaleza teniendo en cuenta la extensión de los entornos construidos, los cultivos, las tierras de pastoreo, la densidad poblacional humana, la presencia de vías como ferrocarriles, carreteras y vías navegables, así como también la luz nocturna. Tiene valores en el rango 0 a 100, representando desde 'ausencia de presencia humana' hasta 'estado muy degradado', respectivamente. De este mapa (originalmente a 1 km de resolución espacial) se extrajo la porción continental de Colombia acoplada a la cuadrícula de 10x10 km y se tomó este indicador como un

reflejo de la degradación de cada unidad de planificación, y por ende, de la idoneidad de cada una de ellas para alcanzar los objetivos de conservación. De esta manera, un área con una degradación muy alta representaría un coste muy alto para la conservación y así mismo un área con degradación baja representaría una 'coste' bajo para la conservación de las especies en peligro, o para la restauración de los hábitats donde estas pudiesen habitar.

En el análisis que se realiza con Marxan, a cada unidad de conservación se le asigna una meta (target) que equivale a la cantidad de ese elemento de conservación que se desea representar/incluir dentro de la red de áreas protegidas (Ardrón et al., 2010), siendo en este caso las especies de vertebrados terrestres amenazadas en Colombia los elementos de conservación. Para indicar a Marxan la magnitud de la importancia de alcanzar los objetivos de área a conservar para cada especie, se modificó el factor de penalización de especies (SPF- Species Penalty Factor, por sus siglas en Inglés) (SPF=100), usando un valor alto para penalizar la optimización si no se alcanzan las metas cuantitativas de cada especie. De esta forma, usando un valor alto de SPF se indica a Marxan lo importante que es alcanzar los targets de las especies, independientemente del coste que ello implique. Se realizó también un ejercicio de sensibilidad de la solución a Marxan a la elección del valor de target. Se utilizaron 11 metas diferentes cuantitativas de especies a conservar (targets=1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 250, 400 y 500), con el objetivo de explorar la relación entre el coste y beneficio, estando el beneficio medido como la cantidad total de cada especie que se quiere cubrir dentro de los espacios protegidos y el coste, como el número de unidades espaciales seleccionadas.

La medida de conectividad de la función objetivo se calcula sumando las penalizaciones por conectividad no incluida entre las unidades de planificación seleccionadas en la solución y las vecinas no incluidas (Game et al., 2008). A mayor número de conexiones no incorporadas en la solución (cuadrículas aisladas sin sus vecinas) mayor es la penalización por falta de conectividad incorporada en la función de objetivos. Para ajustar el parámetro de conectividad y generar un valor para las penalizaciones dadas por él, Marxan utiliza un modificador llamado Modificador de Longitud de Frontera (BLM- Bounday Length Modifier por sus siglas en Inglés) que permite controlar la importancia de la conectividad en la función de objetivos, con relación al resto de parámetros (coste y penalización por no conseguir los targets de las especies) y controlar si las soluciones que ofrece Marxan tienen un patrón más compacto o disperso a través del paisaje. Al aplicar algún tipo de penalización por desconexión, para cada solución se realiza una suma de las fronteras no incluidas en ella. Solo se aplica la penalización en el caso de que no se comparta frontera con otra unidad de planificación que esté incluida en la solución. Al calcular este valor en la función objetivo, la suma de las fronteras se multiplica por el BLM (Ardrón et al., 2010 & Game et al., 2008). Para este ejercicio se utilizó esta medida de conectividad que Marxan usa por defecto, realizándose una calibración del modificador de longitud de frontera (BLM) y decidiendo utilizar un BLM mayor del resultado de la calibración para forzar la conectividad BLM=2 (Tabla 1. Valor de BLM=1 escogido como punto crítico entre el incremento del costo en relación a la reducción de longitud de frontera. Valor de BLM=2 escogido como valor para forzar la conectividad del paisaje.), siendo este valor el determinado como modificador de longitud de frontera eficiente, pues es el

punto crítico en el cual el incremento en el costo del sistema de reservas o su área se torna alto con relación a la correspondiente reducción de la longitud de frontera del sistema (Ardrón et al., 2010).

*Tabla 1. Valor de BLM=1 escogido como punto crítico entre el incremento del costo en relación a la reducción de longitud de frontera. Valor de BLM=2 escogido como valor para forzar la conectividad del paisaje.*

<b>BLM</b>	<b>Coste</b>	<b>Conectividad</b>
0	123.9	2929
0.0001	124.1	2916
0.001	123.7	2862
0.01	126.8	2748
0.1	139.5	2145
<b>1</b>	<b>265.2</b>	<b>1621</b>
<b>2</b>	<b>289.4</b>	<b>1560</b>
5	330.6	1452
12	407.9	1343
22	397.1	1348
35	3851	1342
57	383.2	1327
78	396.8	1267
100	425	1272
200	486.3	1241
300	453.3	1233

Se forzó al algoritmo de Marxan a incluir el sistema actual de espacios protegidos en la solución de la optimización. Dentro de la información inicial suministrada al software, con respecto a los condicionamientos de las unidades de planificación, se estableció que se tomaría el SINAP como un sistema inicial de reserva, por lo tanto quedaría pre-incluido sin la posibilidad de ser eliminada de esta área en las soluciones. De esta forma, se buscó entender si los objetivos de conservación definidos para cada especie se cumplían o no dentro del sistema de reservas existente. En total se fijaron 1679 unidades de planificación dentro de la red actual de espacios protegidos de Colombia (12% del territorio colombiano).

### **Análisis de las regiones de nuevas zonas a conservar**

Cada solución de diseño de reserva arrojada por Marxan plantea nuevas zonas geográficas a preservar. Para analizar los tipos de zonas que se incluyen en las nuevas soluciones, se utilizó el software ArcGis 10.1 (Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2011) en donde se superpusieron las soluciones obtenidas en la cartografía de ecosistemas colombianos disponible en el catálogo de mapas del Sistema de Información Ambiental de Colombia (<http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>) (SIAC, 2007) con la cartografía de municipios y departamentos colombianos descargada del Portal de Datos Abiertos Cartografía y Geografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (<https://geoportal.igac.gov.co>) (IGAC, 2017.)

### 3. Resultados

#### Análisis de representatividad del SINAP (Gap Analysis)

De acuerdo con la superposición de la distribución de las especies de vertebrados terrestres amenazadas en Colombia sobre el mapa de la red de áreas protegidas de este país, se observó que las especies amenazadas están escasamente representadas dentro del SINAP. Solamente una de las especies estudiadas tiene el 100% de su distribución cubierta por el SINAP, tratándose de una especie con un área de distribución menor a 10km<sup>2</sup>. Se observó que 55 especies (el 22,9%) de vertebrados terrestres amenazadas no presentan ningún tipo de cobertura por el SINAP y que el porcentaje de cobertura es inverso al número de especies cubiertas por el sistema, teniendo solamente 8 especies con más del 50% de su distribución cubierta por la red actual de espacios protegidos (Figura 2).

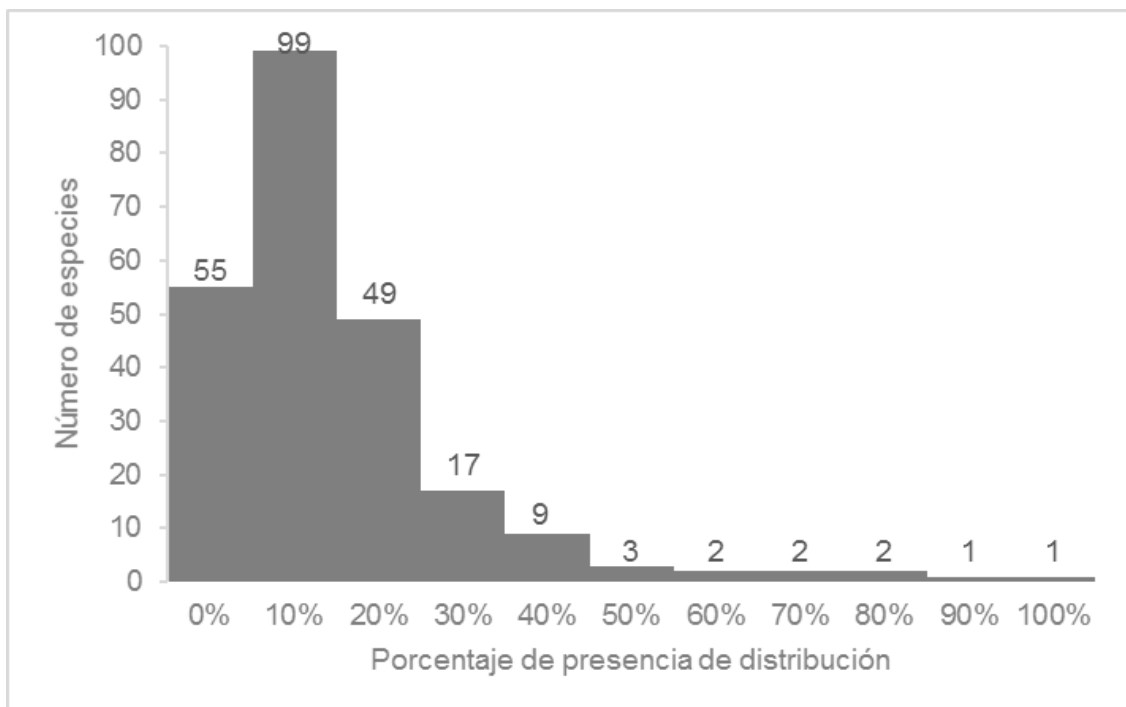


Figura 2. Representatividad de especies de vertebrados terrestres amenazados en la red de áreas protegidas SINAP. Número de especies según el porcentaje de presencia de su distribución dentro del SINAP.

De las 55 especies que no cubre el SINAP, 38 son endémicas para Colombia, 24 son anfibios, 19 aves, 8 reptiles y 4 mamíferos. Además, 17 están amenazadas a nivel global, catalogadas internacionalmente por la IUCN como en peligro crítico (CR) y 12 como amenazadas (EN) (

Anexo 1).

### Identificación de áreas prioritarias para la conservación de especies de vertebrados terrestres amenazados en Colombia

La solución del ejercicio de optimización de Marxan mostró que se cumplieron siempre las metas de conservación pedidas, desde la meta 1, hasta la meta 500 (Figura 3). Incluso cuando se evaluó el cumplimiento de las metas mínimas de elementos de conservación (meta=1), es decir el escenario en que todas las especies estarían representadas en por lo menos una unidad de planificación, el SINAP debería aumentar un mínimo de 1.459 unidades de planificación (22,6% del total del área del territorio continental colombiano) para destino de áreas de conservación (Figura 3). Esto equivaldría a por lo menos 31.380 km<sup>2</sup> de extensión de tierra destinada para la conservación con usos restringidos, contando con las áreas de protección ya existentes. En el caso de querer alcanzar la meta más alta (Target=500), se deberían proteger 8.202 unidades de planificación, lo que equivale a 6.523 unidades de planificación más que las que ya ocupa el SINAP y equivalentes al 59,2% del área continental de Colombia.

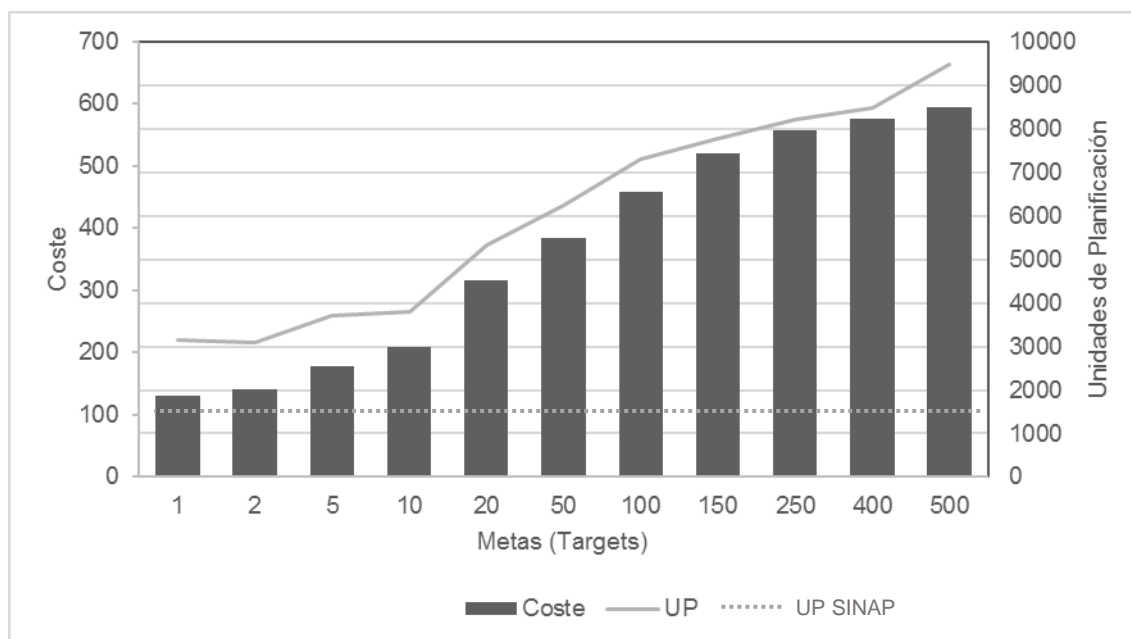


Figura 3. Resultados del análisis de sensibilidad de la solución de Marxan a los targets definidos para las especies. La línea gris representa el cambio del coste de las soluciones en función del target, mientras que las barras muestran el cambio en unidades de planificación. La línea punteada representa las unidades de planificación que ocupa el actual SINAP.

En el primer caso de la utilización de la meta más baja (meta=1) se observó que las zonas en donde se requeriría mayor protección a ser adicionada a la configuración de esta red, se ubican especialmente en la región Andina (Figura 1, Figura 4). En primer lugar se encuentran áreas de la Cordillera Oriental en los departamentos de Boyacá, Santander, Norte de Santander y Arauca, creando una conexión fuerte en las áreas

protegidas que existen en estos departamentos. Las nuevas áreas en esta región corresponden a zonas con ecosistemas naturales intervenidos, que hacen parte de zonas transformadas con diferentes propósitos. Esta zona, es la que representa un coste más alto según la cartografía de la huella ecológica (Venter et al., 2016), presentando valores que oscilan entre 20 y 80, en grado de degradación.

La segunda zona en donde Marxan identifica unidades de planificación a conservar fuera de las áreas protegidas es en la base de la Cordillera Central, en el punto de divergencia, en territorio de los departamentos del Huila, Cauca, Caquetá, Meta y Tolima, en donde se encuentran bosques altoandinos húmedos, bosques húmedos subandinos, bosques de niebla, agroecosistemas colonos mixtos y ecosistemas transformados.

Usando la misma meta cuantitativa (meta=1), aunque en menor medida que las regiones ya nombradas también sobresale la región Amazónica, la cual se incluye con varias unidades de planificación en la conexión entre áreas protegidas existentes en los departamentos de Caquetá, Guaviare y Guainía. Estas zonas presentan ecosistemas de bosque húmedo tropical en su mayoría, así como también llanuras de inundación de ríos amazónicos y algunas planicies sedimentarias ligeramente onduladas.

A medida que se incrementan las metas cuantitativas de conservación, la región Pacífica toma protagonismo con una alta cantidad de unidades de planificación a ser conservadas (Figura 4 B-D). Se aumentan también las áreas en casi todo el sistema de cordilleras, la región Amazónica aumenta en área a conservar, y se incluye la región Caribe en una proporción menor.

Con una meta de conservación alta de por lo menos 250 unidades de planificación de conservación para cada especie, se incluyen zonas en los departamentos de Nariño y Valle del Cauca, y la región Caribe aumenta considerablemente en área a ser protegida (Figura 4, D).





Figura 4. Representación de soluciones de MARXAN a niveles crecientes con metas (targets) exigidas para la conservación de las especies amenazadas de vertebrados terrestres listadas en la Res. 1912 de 2017: solución cuando: A) meta= 1; B) meta=50; C) meta= 100; D) meta= 250. En gris claro: representación de la solución de Marxan solución según cada meta cuantitativa, usando BLM=2. En gris oscuro: representación del SINAP actual.

#### 4. Discusión

Mediante la metodología de Gap Analysis se identificó que el sistema de áreas protegidas de Colombia cubre pobremente a las especies de vertebrados terrestres amenazadas del país. La herramienta de la planificación sistemática mostró que, incluso cuando se fijasen metas mínimas de conservación para las especies, se necesitaría proteger 1459 unidades de planificación más, lo que equivale a 14.590 km<sup>2</sup>, equivalente a 7.8% más de la extensión continental de Colombia ya protegida. Asimismo, se identificó que la región Andina, especialmente sobre la Cordillera Oriental, es la zona que tiene mayor prioridad de ser protegida, en la búsqueda de la conservación de las especies de vertebrados amenazados terrestres.

El estudio de representatividad de especies amenazadas dentro del SINAP, muestra que la red es poco representativa de las distribuciones de las especies de vertebrados terrestres amenazadas en Colombia, pues el 23% de las especies estudiadas no tienen representación dentro del SINAP y el 41% de las especies tiene solamente el 10% de su rango de distribución incluido. Esto corrobora lo que Moreno et al., 2017 advierte en el informe del estado de la biodiversidad del país, sobre la evidencia de un mayor riesgo de extinción para las especies globalmente amenazadas presentes en Colombia, pues estas especies no parecen estar mejorando su estado de conservación a nivel global (Moreno *et al.*, 2017). De igual forma, muestra la necesidad de generar más acciones para la consecución de la meta 12 del Plan Estratégico para la Diversidad Biológica (CBD, 2010). A pesar de que Colombia ha ampliado su red de áreas protegidas sustancialmente a partir de los acuerdos de conservación internacionales (UNEP-WCMC, IUCN and NGS, 2018), los resultados obtenidos en este estudio muestran la necesidad de seguir ampliando la cobertura del SINAP, no solo porque las especies están pobremente representadas, sino porque solo el 15,4% de las especies con distribuciones restringidas a un área menor de 30km<sup>2</sup> tienen distribuciones incluidas dentro de esta red. También, el hecho de que exista un sistema de áreas protegidas aisladas, puede eventualmente ser contraproducente para las especies que se enfrentan a la extinción debido al calentamiento global. La reducida conectividad entre espacios protegidos dificulta la movilidad de las especies entre parches de hábitat favorable, imposibilitando su conservación a largo plazo (Saura et al., 2017). Esto puede ser especialmente peligroso para especies que tienen distribuciones restringidas, ya que tienen una mayor probabilidad de que su área de idoneidad ambiental disminuya en un umbral dentro de un periodo de tiempo específico (Shoo et al., 2013).

Como resultado a las necesidades espaciales de la distribución de cada especie, se observó que a mayor meta cuantitativa a conservar, es necesaria una mayor superficie y los valores de coste también incrementan. La región Andina, que es la zona que presenta una mayor prioridad de conservación, es donde se concentra el mayor grado de humanización del país (Venter et al., 2016); por ende, los valores de huella ecológica de las unidades de planificación llegan hasta 78 en esta área. Para efectos de conservación de especies que pueden llegar a ser más generalistas, es importante no descartar las áreas en donde el grado de humanización es elevado, ya que pueden ser indispensables para garantizar la permanencia de especies que tienen presencia en paisajes humanizados (Hermoso et al., 2015). Asimismo, el incremento de la

conectividad entre estas áreas, como la implementación de corredores urbanos y rurales, ayudaría al mantenimiento de procesos involucrados en la conservación de la biodiversidad, como lo son las dispersiones de especies, el intercambio de material genético, migraciones y subsistencia de los ecosistemas que soportan estos taxones (Spiliopoulou et al., 2017; Santini et al., 2016; Brodie et al., 2015). Además, se hace urgente la necesidad de que esta ampliación se realice mediante la planeación sistemática para la conservación, ya que para el incremento de área del SINAP, es necesario entender cuáles son los lugares prioritarios para actuar al menor costo posible y dar soluciones de manejo que integren la conservación de la biodiversidad en las acciones de gestión del territorio (Stein et al., 2009).

Es de igual importancia que la utilización de métodos para el monitoreo de estas acciones de conservación apliquen metodologías que conlleven a un seguimiento efectivo de la preservación de las especies (Morán-Ordóñez et al., 2018). Se hace necesario que las entidades gubernamentales sean protagonistas de este proceso garantizando la funcionalidad de las áreas protegidas, desde necesidades que son importantes desde la perspectiva política, como son el control de los usos del suelo, la gestión de las implicaciones ecológicas y socioeconómicas (Hermoso et al., 2018b; Murcia et al., 2016; Murcia et al., 2013) y sobre todo el manejo de grandes extensiones de tierra deforestadas, que han sido usadas para cultivos ilícitos y actividades inherentes al conflicto armado que vive el país (Negret et al., 2019; Negret et al., 2017).

Dentro de las ventajas del uso de la planificación sistemática está el hecho de utilizar una metodología robusta que ayuda a alcanzar los objetivos de conservación de las especies a un menor coste. Sin embargo existen limitaciones como el vacío de información para todos los grupos taxonómicos (Moreno et al., 2017), así como también la necesidad de obtención de datos más finos para las especies y estimas económicas. Sería apropiado contrastar este análisis con el análisis realizado por González et al. , 2019, en donde evaluaron las especies endémicas en relación a las áreas protegidas y la deforestación, ya que Colombia presenta una gran cantidad de endemismos de especies que se asocian a un punto caliente de biodiversidad (Terborgh and Winter, 1983) y son por este motivo un objetivo de conservación global. Asimismo, es prioritaria la inclusión de análisis de representatividad de ecosistemas claves para la conservación (Sierra et al., 2002), porque así las metas no recaen solo en las especies raras y amenazadas; si solo se tuvieran en cuenta estas metas no se garantizaría el funcionamiento saludable del ecosistema (Ardrón et al., 2010). Además, incluir la porción marítima generaría una estrategia más completa y realista para la conservación de la biodiversidad colombiana.

La inclusión de las especies de vertebrados amenazadas dentro del SINAP, generada desde una reestructuración de la red de espacios protegidos mediante la planificación sistemática, no solamente generaría verdaderos cambios en la conservación de la fauna encaminada a frenar la extinción de especies, sino que también serviría como base para la priorización de áreas en beneficio de la conservación de la biodiversidad en general, que no solamente es importante para alcanzar las metas de los convenios internacionales de los que Colombia hace parte, sino también para la contribución del mejoramiento de los servicios ecosistémicos que puede proveer la naturaleza en este país megadiverso.

## **5. Conclusiones**

Este estudio muestra los vacíos que presenta actualmente el sistema de áreas protegidas de Colombia con respecto a la cobertura de las distribuciones de especies de vertebrados terrestres, listadas en la Resolución nacional N° 1912 de 2017. Se muestra que la red provee una cobertura muy pobre del número de especies de vertebrados terrestres amenazados, donde 55 de las 240 especies no tienen representación dentro de los espacios protegidos. En especial, llaman la atención las especies con distribuciones restringidas (15% de las especies con áreas de distribución menor de 30 km<sup>2</sup>), que en su mayoría presentan alerta de extinción local y global, y actualmente no están cubiertas por la red de áreas protegidas. Por lo tanto, se hace necesario tomar medidas frente a la conservación específica de estas especies y la ampliación de la red de espacios protegidos de Colombia.

El ejercicio de planificación espacial que se desarrolla en este estudio mostró que las zonas de cordillera situadas en la región andina, son de elevada importancia para la conservación de las especies amenazadas, puesto que allí se concentran muchas especies con distribuciones restringidas y se presentan endemismos vinculados con procesos evolutivos y ecológicos como el levantamiento de los Andes (Moreno et al. , 2019). Dado el alto grado de humanización que esta región presenta, es necesaria la implementación de estrategias de restauración de la conectividad en el paisaje.

Este trabajo pone en evidencia que la planificación sistemática es necesaria para el ejercicio de la evaluación del estado de la biodiversidad en Colombia y la propuesta de soluciones de conservación que tengan en consideración los valores ecológicos intrínsecos y funcionales del paisaje, como lo es la conectividad ecológica adecuada. Un ejercicio de planificación como el aquí presentado, que incluya un mayor número de especies amenazadas y la porción marítima de Colombia, ayudaría en la formulación de planes de acción que permitan la conservación de especies amenazadas en el país.

## **6. Agradecimientos**

A mis directores Virgilio Hermoso y Alejandra Morán por su paciencia, su transmisión de conocimientos y su incondicionalidad.

A mi tutora Núria Bonada y al personal del FEHM-Lab por abrirme las puertas del laboratorio.

A Albert Ferré Codina y a Juan Sebastián Velásquez por su asistencia con el software ArcGIS, a José Manuel Blanco y Mateo Buitrago por su asistencia con el software R y a Victor Domingo Prieto por su asistencia en el manejo de datos.

Este manuscrito se benefició con los comentarios de Valentina Ocampo Flórez y Ricardo Botero Trujillo.

Agradezco igualmente a todo el equipo del CTFC por su colaboración en Solsona.

A mi familia por su apoyo infinito desde la distancia.

## 7. Bibliografía

Arbeláez-Cortés, E., 2013. Knowledge of Colombian biodiversity: Published and indexed. *Biodivers. Conserv.* 22, 2875–2906. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0560-y>

Ardron, J. H.P. Possingham, C.J. Klein (Editores.), Version 2, 2010. *Marxan good practices handbook*. University of Queensland, St. Lucia, Queensland, Australia, and Pacific Marine Analysis and Research Association, Vancouver, British Columbia, Canada.

BirdLife International y NatureServe, 2015. Bird species distribution maps of the world. Version 5.0. <http://datazone.birdlife.org/species> (Último acceso 11.15.19).

Brodie, J.F., Giordano, A.J., Dickson, B., Hebblewhite, M., Bernard, H., Mohd-Azlan, J., Anderson, J., Ambu, L., 2015. Evaluating multispecies landscape connectivity in a threatened tropical mammal community. *Conserv. Biol.* 29, 122–132. <https://doi.org/10.1111/cobi.12337>

Bruner, A.G., Gullison, R.E., Rice, R.E., Da Fonseca, G.A.B., 2001. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. *Science* (80). 291, 125–128. <https://doi.org/10.1126/science.291.5501.125>

Cabeza, M., 2013. Knowledge gaps in protected area effectiveness. *Anim. Conserv.* 16, 381–382. <https://doi.org/10.1111/acv.12070>

CBD, 2017. Scenarios for the 2050 vision for biodiversity. <https://www.cbd.int/doc/meetings/sbstta/sbstta-21/official/sbstta-21-02-en> (Último acceso 10.10.19)

CBD, 2010. Aichi Biodiversity Targets. Aichi Biodiversity Targets 9–10. <https://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml>. (Último acceso 10.17.19)

Choe, H., Thorne, J.H., Huber, P.R., Lee, D., Quinn, J.F., 2018. Assessing shortfalls and complementary conservation areas for national plant biodiversity in South Korea. *PLoS One* 13, 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190754>

Datos Abiertos Cartografía y Geografía | Geoportal. 2015. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia> (Último acceso 10.17.19).

Diaz, S., Duffy, J., 2006. Biodiversity and Ecosystem Services for the Americas, Ipbes. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00349-X>

Dobson, A.P., Rodriguez, J.P., Roberts, W.M., Wilcove, D.S., 1997. Geographic distribution of endangered species in the United States. *Science* (80). 275, 550–553. <https://doi.org/10.1126/science.275.5299.550>

Fajardo, J., Lessmann, J., Bonaccorso, E., Devenish, C., Muñoz, J., 2014. Combined use of systematic conservation planning, species distribution modelling, and connectivity analysis reveals severe conservation gaps in a megadiverse country (Peru). *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114367>

- Fonseca, C.R., Venticinque, E.M., 2018. Biodiversity conservation gaps in Brazil: A role for systematic conservation planning. *Perspect. Ecol. Conserv.* <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.03.001>
- Forero-Medina, G., Joppa, L., 2010. Representation of global and national conservation priorities by Colombia's protected area network. *PLoS One* 5, 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013210>
- Game, E.T. and H.S. Grantham, 2008. *Marxan User Manual: For Marxan version 1.8.10*. University of Queensland, St. Lucia, Queensland, Australia, and Pacific Marine Analysis and Research Association, Vancouver, British Columbia, Canada.
- González, I., Noguera-Urbano, E. A., Velásquez-Tibatá, Ochoa-Quintero, J.M. 2018. Especies endémicas, áreas protegidas y deforestación. En: Moreno, L. A, Andrade, G. I. y Gómez, M. F. (Editores.). 2019. Biodiversidad 2018. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.
- Hermoso, V., Abell, R., Linke, S., Boon, P., 2016. The role of protected areas for freshwater biodiversity conservation: challenges and opportunities in a rapidly changing world. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 26, 3–11. <https://doi.org/10.1002/aqc.2681>
- Hermoso, V., Cattarino, L., Linke, S., Kennard, M.J., 2018a. Catchment zoning to enhance co-benefits and minimize trade-offs between ecosystem services and freshwater biodiversity conservation. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 28, 1004–1014. <https://doi.org/10.1002/aqc.2891>
- Hermoso, V., Filipe, A.F., Segurado, P., Beja, P., 2015. Filling gaps in a large reserve network to address freshwater conservation needs. *J. Environ. Manage.* 161, 358–365. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.023>
- Hermoso, V., Morán-Ordóñez, A., Brotons, L., 2018b. Assessing the role of Natura 2000 at maintaining dynamic landscapes in Europe over the last two decades: implications for conservation. *Landsc. Ecol.* 33, 1447–1460. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0683-3>
- Hermoso, V., Ward, D.P., Kennard, M.J., 2013. Prioritizing refugia for freshwater biodiversity conservation in highly seasonal ecosystems. *Divers. Distrib.* 19, 1031–1042. <https://doi.org/10.1111/ddi.12082>
- Herrera, B., Finegan, B., 2008. Introducción a la planificación sistemática para la conservación de la biodiversidad. La planificación sistemática como instrumento para la conservación de la biodiversidad. Planificación sistemática en áreas protegidas y corredores biológicos de Costa Ric. *Recur. Naturaleza y Ambiente.* 4.
- Hugh P. Possingham, Kerrie A. Wilson, Sandy J. Andelman, C.H.V., 2014. *Principles of Conservation Biology. Protected Areas: Goals, Limitations, and Design.*, 3a ed. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA.
- IGAC, I.G.A.C., 2002. Cartografía de las Regiones Naturales de Colombia. <https://www.igac.gov.co/>. (Último acceso 12.27.18)
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources - IUCN, 2019. Spatial data and mapping resources. <https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download> (Último acceso 12.27.18).

IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science- Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editores) 1–44.

Malagón, D., 2002. Los suelos de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, D.C. Colombia. 21p.

Margules, C.R., Pressey, R.L., 2000. Systematic conservation planning. *Nature* 405, 243–253. <https://doi.org/10.1038/35012251>

Matallana, C.L., 2018. Other effective area-based conservation measures (OECM): The case of Colombia Working group on Complementary Conservation Strategies, in: Working Group on Complementary Conservation Strategies. IAVH - Instituto Alexander Von Humboldt; Fundación Natura Colombia & Resnatur.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017. Resolución 1912 de 2017. “Por la cual se establece el listado de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana continental y marino-costera que se encuentran en el territorio nacional, y se dictan otras disposiciones”.

Morán-Ordóñez, A., Canessa, S., Bota, G., Brotons, L., Herrando, S., Hermoso, V., 2018. Efficiency of species survey networks can be improved by integrating different monitoring approaches in a spatial prioritization design. *Conserv. Lett.* 11. <https://doi.org/10.1111/conl.12591>

Moreno, L. A., Andrade, G. I. y Gómez, M.F. 2019. Biodiversidad 2018. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Ed. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.

Moreno, L. A., Andrade, G. I., y Ruíz-Contreras, L.F. (Editores.) ., 2017. Biodiversidad 2016. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia, Moreno, L. Ed. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, D. C., Colombia.

Murcia, C., Guariguata, M.R., Andrade, Á., Andrade, G.I., Aronson, J., Escobar, E.M., Etter, A., Moreno, F.H., Ramírez, W., Montes, E., 2016. Challenges and Prospects for Scaling-up Ecological Restoration to Meet International Commitments: Colombia as a Case Study. *Conserv. Lett.* 9, 213–220. <https://doi.org/10.1111/conl.12199>

Murcia, C., Kattan, G.H., Andrade-Perez, G.I., 2013. Conserving Biodiversity in a Complex Biological and Social Setting: The Case of Colombia BT- Conservation Biology: Voices from the Tropics. *Conserv. Biol. Voices from Trop.* 1–11.

Negret, P.J., Allan, J., Braczkowski, A., Maron, M., Watson, J.E.M., 2017. Need for conservation planning in postconflict Colombia. *Conserv. Biol.* 31, 499–500. <https://doi.org/10.1111/cobi.12935>

Negret, P.J., Sonter, L., Watson, J.E.M., Possingham, H., Jones, K.R., Cesar, S., Ochoa-Quintero, J.M., Maron, M., 2019. Emerging evidence that armed conflict and coca cultivation influence deforestation patterns. *Biol. Conserv.* <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.07.021>

Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2016. Sistema Nacional de Áreas Protegidas – SINAP | Parques Nacionales Naturales de Colombia. <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sistema-nacional-de-areas-protegidas-sinap/> (Último acceso 9.13.19).

- Rodríguez, N., Armenteras, D., Retana, J., 2013. Effectiveness of protected areas in the Colombian Andes: Deforestation, fire and land-use changes. *Reg. Environ. Chang.* 13, 423–435. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0356-8>
- Sánchez-Cuervo, A.M., Aide, T.M., Clark, M.L., Etter, A., 2012. Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Trends between 2001 and 2010. *PLoS One* 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043943>
- Santini, L., Saura, S., Rondinini, C., 2016. Connectivity of the global network of protected areas. *Divers. Distrib.* <https://doi.org/10.1111/ddi.12390>
- Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., Dubois, G., 2017. Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecol. Indic.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>
- Shoo, L.P., Hoffmann, A.A., Garnett, S., Pressey, R.L., Williams, Y.M., Taylor, M., Falconi, L., Yates, C.J., Scott, J.K., Alagador, D., Williams, S.E., 2013. Making decisions to conserve species under climate change. *Clim. Change* 119, 239–246. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0699-2>
- SIAC, 2007. Catálogo de mapas – IDEAM. Sist. Inf. Ambient. del Colomb. URL <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas> (Último acceso 9.6.19).
- Sierra, R., Campos, F., Chamberlin, J., 2002. Assessing biodiversity conservation priorities: Ecosystem risk and representativeness in continental Ecuador. *Landsc. Urban Plan.* 59, 95–110. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00006-3)
- Spiliopoulou, K., Burgess, N.D., Arnell, A., 2017. Title: Connectivity Conservation and Modelling Subtitle: A framework for assessing functional connectivity at a global scale using a representative sample of species.
- Sritharan, S., 2009. Extended Gap Analysis for Important Bird Areas of Tanzania. Tesis MSc. Universidad de East Anglia, Universidad Plain. Noruega.
- Stein, J., Watts, M., Wilson, K., Carwardine, J., Smith, M.S., Mackey, B., Possingham, H., Klein, C., Berry, S., 2009. Incorporating ecological and evolutionary processes into continental-scale conservation planning. *Ecol. Appl.* 19, 206–217. <https://doi.org/10.1890/07-1684.1>
- Terborgh, J., Winter, B., 1983. A method for siting parks and reserves with special reference to Columbia and Ecuador. *Biol. Conserv.* 27, 45–58. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(83\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0006-3207(83)90005-8)
- United Nations, 2018a. Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> (Último acceso 10.9.19).
- United Nations, 2018b. The Paris Agreement | UNFCCC. United Nations Framew. Conv. Clim. Chang. URL <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement> (Último acceso 10.1.19).
- Venter, O., Sanderson, E.W., Magrath, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R., Possingham, H.P., Laurance, W.F., Wood, P., Fekete, B.M., Levy, M.A., Watson, J.E.M., 2016. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nat. Commun.* 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms12558>



Worboys, G.L., Ament, R., Day, J.C., Lausche, B., Locke, H., McClure, M., Peterson, C.H., Pittock, J., Tabor, G. and Woodley, S. (Editores) (2016), Advanced Draft, Area of Connectivity Conservation Guidelines IUCN, 28 Rue Mauverney, Gland, Switzerland.

Anexo 1. Listado de especies de vertebrados terrestres amenazadas incluidas en el estudio con estado de amenaza según la Resolución 1912 de 2017 y la IUCN.

Clase	Especie	Res. 1912/17	IUCN
Mammalia	<i>Aotus griseimembra</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Aotus lemurinus</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Ateles belzebuth</i>	VU	EN
Mammalia	<i>Ateles geoffroyi</i>	EN	EN
Mammalia	<i>Callimico goeldii</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Dinomys branickii</i>	VU	LC
Mammalia	<i>Lycalopex culpaeus</i>	VU	LC
Mammalia	<i>Lagothrix lagotricha</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Lontra longicaudis</i>	VU	NT
Mammalia	<i>Mustela felipei</i>	EN	VU
Mammalia	<i>Myrmecophaga tridactyla</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Panthera onca</i>	VU	NT
Mammalia	<i>Pteronura brasiliensis</i>	EN	EN
Mammalia	<i>Saguinus leucopus</i>	VU	EN
Mammalia	<i>Saguinus oedipus</i>	CR	CR
Mammalia	<i>Coendou vestitus</i>	VU	DD
Mammalia	<i>Tapirus bairdii</i>	CR	EN
Mammalia	<i>Tapirus pinchaque</i>	EN	EN
Mammalia	<i>Tapirus terrestris</i>	EN	VU
Mammalia	<i>Tremarctos ornatus</i>	VU	EN
Mammalia	<i>Aotus brumbacki</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Plecturocebus ornatus</i>	VU	VU
Mammalia	<i>Aotus zonalis</i>	VU	DD
Mammalia	<i>Alouatta palliata</i>	VU	LC
Mammalia	<i>Ateles hybridus</i>	CR	CR
Mammalia	<i>Plecturocebus discolor</i>	VU	LC
Mammalia	<i>Odocoileus virginianus</i>	CR	LC
Mammalia	<i>Ateles fusciceps</i>	EN	CR
Mammalia	<i>Leopardus tigrinus</i>	VU	VU
Reptilia	<i>Crocodylus acutus</i>	EN	VU
Reptilia	<i>Crocodylus intermedius</i>	CR	CR
Reptilia	<i>Melanosuchus niger</i>	VU	CD
Reptilia	<i>Podocnemis lewyana</i>	CR	CR
Reptilia	<i>Ptychoglossus danieli</i>	CR	CR
Reptilia	<i>Atractus nicefori</i>	VU	VU
Reptilia	<i>Tantilla nigra</i>	DD	DD
Reptilia	<i>Urotheca dumerilli</i>	DD	DD
Reptilia	<i>Xenopholis scalaris</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Thamnodynastes pallidus</i>	DD	DD
Reptilia	<i>Trilepida joshuai</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Trilepida nicefori</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Anolis ruizii</i>	EN	EN

Clase	Especie	Res. 1912/17	IUCN
Reptilia	<i>Tropidurus torquatus</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Anolis ventrimaculatus</i>	DD	NT
Reptilia	<i>Aristelliger georgeensis</i>	VU	LC
Reptilia	<i>Morunasaurus annularis</i>	VU	VU
Reptilia	<i>Morunasaurus groi</i>	EN	EN
Reptilia	<i>Ungaliophis panamensis</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Dendrophidion boshelli</i>	CR	CR
Reptilia	<i>Tantilla alticola</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Tantilla reticulata</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Tantilla semicincta</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Tantilla supracincta</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Tretanorhinus taeniatus</i>	DD	NT
Reptilia	<i>Urotheca fulviceps</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Urotheca lateristriga</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Trilepida dugandi</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Anadia bogotensis</i>	VU	NT
Reptilia	<i>Anadia pamplonensis</i>	EN	EN
Reptilia	<i>Riama columbiana</i>	EN	EN
Reptilia	<i>Riama laevis</i>	VU	VU
Reptilia	<i>Riama simotera</i>	EN	EN
Reptilia	<i>Tretioscincus bifasciatus</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Enyalioides oshaughnessyi</i>	VU	VU
Reptilia	<i>Lepidoblepharis miyatai</i>	EN	CR
Reptilia	<i>Saphenophis sneiderni</i>	EN	EN
Reptilia	<i>Synophis plectovertebralis</i>	CR	CR
Reptilia	<i>Thamnodynastes gambotensis</i>	DD	LC
Reptilia	<i>Anadia antioquensis</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Atelopus eusebianus</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Atelopus lozanoi</i>	CR	EN
Amphibia	<i>Atelopus muisca</i>	CR	EN
Amphibia	<i>Atelopus pedimarmoratus</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Osornophryne percrassa</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Rhinella macrorhina</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Hyloxalus edwardsi</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Allobates ranoides</i>	CR	EN
Amphibia	<i>Hyloxalus ruizi</i>	CR	CR
Amphibia	<i>Andinobates bombetes</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Oophaga lehmanni</i>	CR	CR
Amphibia	<i>Oophaga occultator</i>	VU	CR
Amphibia	<i>Phyllobates terribilis</i>	CR	EN
Amphibia	<i>Hyla nicefori</i>	CR	DD
Amphibia	<i>Gastrotheca espeletia</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Gastrotheca ruizi</i>	EN	NT
Amphibia	<i>Hemiphractus johnsoni</i>	VU	EN

Clase	Especie	Res. 1912/17	IUCN
Amphibia	<i>Ecnomiohyla phantasmagoria</i>	CR	DD
Amphibia	<i>Atopophrynus syntomopus</i>	CR	CR
Amphibia	<i>Pristimantis actinolaimus</i>	VU	EN
Amphibia	<i>Pristimantis acutirostris</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Pristimantis carrangerorum</i>	VU	EN
Amphibia	<i>Pristimantis fallax</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Pristimantis fetosus</i>	VU	NT
Amphibia	<i>Strabomantis ingeri</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Pristimantis jorgevelosai</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Pristimantis lichenoides</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Pristimantis maculosus</i>	EN	VU
Amphibia	<i>Pristimantis mnionaetes</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Strabomantis necopinus</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Pristimantis renjiforum</i>	VU	EN
Amphibia	<i>Pristimantis repens</i>	EN	VU
Amphibia	<i>Strabomantis ruizi</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Pristimantis scoloblepharus</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Pristimantis suetus</i>	VU	VU
Amphibia	<i>Pristimantis torrenticola</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Pristimantis tribulosus</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Pristimantis veletis</i>	EN	CR
Amphibia	<i>Niceforonia adenobrachia</i>	EN	EN
Amphibia	<i>Bolitoglossa capitana</i>	CR	CR
Amphibia	<i>Bolitoglossa lozanoi</i>	VU	LC
Amphibia	<i>Bolitoglossa pandi</i>	EN	LC
Aves	<i>Tinamus osgoodi</i>	EN	VU
Aves	<i>Crypturellus obsoletus</i>	CR	LC
Aves	<i>Crypturellus kerriae</i>	VU	VU
Aves	<i>Penelope ortonii</i>	VU	EN
Aves	<i>Penelope perspicax</i>	EN	EN
Aves	<i>Pauxi pauxi</i>	EN	EN
Aves	<i>Crax rubra</i>	VU	VU
Aves	<i>Crax alberti</i>	CR	CR
Aves	<i>Crax daubentoni</i>	EN	NT
Aves	<i>Crax globulosa</i>	EN	EN
Aves	<i>Odontophorus melanonotus</i>	EN	VU
Aves	<i>Odontophorus dialeucos</i>	EN	VU
Aves	<i>Odontophorus strophium</i>	EN	VU
Aves	<i>Chauna chavaria</i>	VU	NT
Aves	<i>Oressochen jubatus</i>	VU	NT
Aves	<i>Anas cyanoptera</i>	EN	LC
Aves	<i>Anas georgica</i>	VU	LC
Aves	<i>Netta erythrophthalma</i>	CR	LC
Aves	<i>Veniliornis callonotus</i>	EN	LC

Clase	Especie	Res. 1912/17	IUCN
Aves	<i>Campephilus गयाquilensis</i>	EN	NT
Aves	<i>Capito squamatus</i>	VU	NT
Aves	<i>Capito hypoleucus</i>	EN	VU
Aves	<i>Andigena laminirostris</i>	EN	NT
Aves	<i>Andigena hypoglauca</i>	VU	NT
Aves	<i>Galbula pastazae</i>	VU	VU
Aves	<i>Neomorphus radiolosus</i>	EN	EN
Aves	<i>Ara militaris</i>	VU	VU
Aves	<i>Ara ambiguus</i>	EN	EN
Aves	<i>Leptosittaca branickii</i>	VU	VU
Aves	<i>Ognorhynchus icterotis</i>	EN	EN
Aves	<i>Pyrrhura viridicata</i>	EN	EN
Aves	<i>Pyrrhura calliptera</i>	VU	VU
Aves	<i>Bolborhynchus ferrugineifrons</i>	VU	VU
Aves	<i>Hapalopsittaca amazonina</i>	VU	VU
Aves	<i>Hapalopsittaca fuertesi</i>	CR	CR
Aves	<i>Pionus fuscus</i>	EN	LC
Aves	<i>Campylopterus phainopeplus</i>	VU	EN
Aves	<i>Lepidopyga lilliae</i>	EN	CR
Aves	<i>Goethalsia bella</i>	VU	NT
Aves	<i>Amazilia castaneiventris</i>	EN	EN
Aves	<i>Anthocephala floriceps</i>	VU	VU
Aves	<i>Coeligena orina</i>	EN	CR
Aves	<i>Heliangelus zusii</i>	CR	DD
Aves	<i>Eriocnemis mirabilis</i>	EN	EN
Aves	<i>Leptotila jamaicensis</i>	CR	LC
Aves	<i>Leptotila conoveri</i>	VU	EN
Aves	<i>Zentrygon goldmani</i>	VU	NT
Aves	<i>Rallus semiplumbeus</i>	EN	EN
Aves	<i>Porphyriops melanops</i>	EN	LC
Aves	<i>Circus cinereus</i>	EN	LC
Aves	<i>Buteogallus solitarius</i>	CR	NT
Aves	<i>Spizaetus isidori</i>	EN	EN
Aves	<i>Micrastur plumbeus</i>	EN	VU
Aves	<i>Sula leucogaster</i>	EN	LC
Aves	<i>Egretta rufescens</i>	VU	NT
Aves	<i>Vultur gryphus</i>	CR	NT
Aves	<i>Polystictus pectoralis</i>	VU	NT
Aves	<i>Pseudocolopteryx acutipennis</i>	CR	LC
Aves	<i>Phylloscartes lanyoni</i>	EN	EN
Aves	<i>Myiotheretes pernix</i>	EN	EN
Aves	<i>Muscisaxicola maculirostris</i>	EN	LC
Aves	<i>Doliornis remseni</i>	EN	VU
Aves	<i>Ampelion rufaxilla</i>	VU	LC

Clase	Especie	Res. 1912/17	IUCN
Aves	<i>Pyroderus scutatus</i>	VU	LC
Aves	<i>Cephalopterus penduliger</i>	EN	VU
Aves	<i>Xenopipo flavicapilla</i>	VU	VU
Aves	<i>Clytoctantes alixii</i>	VU	EN
Aves	<i>Xenornis setifrons</i>	VU	VU
Aves	<i>Dysithamnus occidentalis</i>	VU	VU
Aves	<i>Asthenes perijana</i>	EN	EN
Aves	<i>Margarornis bellulus</i>	VU	NT
Aves	<i>Grallaria gigantea</i>	VU	VU
Aves	<i>Grallaria alleni</i>	EN	VU
Aves	<i>Grallaria kaestneri</i>	EN	EN
Aves	<i>Grallaria bangsi</i>	VU	VU
Aves	<i>Grallaria rufocinerea</i>	VU	VU
Aves	<i>Grallaria milleri</i>	EN	VU
Aves	<i>Scytalopus panamensis</i>	VU	VU
Aves	<i>Vireo masteri</i>	VU	EN
Aves	<i>Vireo caribaeus</i>	VU	VU
Aves	<i>Cyanolyca pulchra</i>	VU	NT
Aves	<i>Myadestes coloratus</i>	VU	LC
Aves	<i>Cistothorus apolinari</i>	CR	EN
Aves	<i>Thryothorus nicefori</i>	CR	CR
Aves	<i>Troglodytes monticola</i>	EN	CR
Aves	<i>Eremophila alpestris</i>	EN	LC
Aves	<i>Carduelis cucullata</i>	EN	VU
Aves	<i>Ammodramus savannarum</i>	EN	LC
Aves	<i>Arremon schlegeli</i>	VU	LC
Aves	<i>Atlapetes flaviceps</i>	VU	EN
Aves	<i>Atlapetes fuscoolivaceus</i>	VU	NT
Aves	<i>Dendroica cerulea</i>	VU	VU
Aves	<i>Basileuterus basilicus</i>	EN	VU
Aves	<i>Basileuterus conspicillatus</i>	VU	NT
Aves	<i>Basileuterus ignotus</i>	EN	VU
Aves	<i>Chlorospingus inornatus</i>	VU	LC
Aves	<i>Chlorospingus flavovirens</i>	VU	VU
Aves	<i>Creurgops verticalis</i>	VU	LC
Aves	<i>Bangsia melanochlamys</i>	VU	VU
Aves	<i>Bangsia aureocincta</i>	VU	EN
Aves	<i>Buthraupis wetmorei</i>	VU	VU
Aves	<i>Chlorochrysa nitidissima</i>	VU	VU
Aves	<i>Tangara fucosa</i>	VU	NT
Aves	<i>Dacnis hartlaubi</i>	VU	VU
Aves	<i>Dacnis berlepschi</i>	EN	VU
Aves	<i>Diglossa gloriosissima</i>	VU	EN
Aves	<i>Cardinalis phoeniceus</i>	VU	LC

Clase	Especie	Res. 1912/17	IUCN
Aves	<i>Psarocolius cassini</i>	EN	EN
Aves	<i>Icterus leucopteryx</i>	CR	LC
Aves	<i>Hypopyrrhus pyrohypogaster</i>	VU	VU
Aves	<i>Macroagelaius subalaris</i>	EN	EN
Aves	<i>Molothrus armenti</i>	VU	LC
Aves	<i>Glaucidium nubicola</i>	VU	VU
Aves	<i>Oxypogon cyanoaemus</i>	EN	CR
Aves	<i>Oxypogon stuebelii</i>	EN	VU
Aves	<i>Sula granti</i>	VU	LC
Aves	<i>Scytalopus sanctaemartae</i>	VU	LC
Aves	<i>Lipaugus weberi</i>	CR	CR
Aves	<i>Phoenicopterus ruber</i>	EN	LC
Aves	<i>Henicorhina negreti</i>	VU	VU
Aves	<i>Scytalopus stilesi</i>	EN	LC
Aves	<i>Scytalopus rodriguezi</i>	VU	EN
Aves	<i>Icterus icterus</i>	VU	LC
Aves	<i>Eriocnemis isabellae</i>	CR	CR
Aves	<i>Atlapetes blancae</i>	CR	CR
Aves	<i>Clibanornis rufipectus</i>	VU	NT
Aves	<i>Grallaria urraoensis</i>	EN	CR
Aves	<i>Scytalopus canus</i>	EN	EN