



Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación

Sarai Yuliana García Ospina

Trabajo de grado presentado para optar al título de Bióloga

Asesora

Natalia Ocampo Peñuela, Doctor (PhD) en Ciencias y Política Ambiental

Coasesor

Juan Luis Parra, Doctor (PhD) en Biología Integrativa

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Biología

El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia

2023

Cita

(García-Ospina et al., 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

García-Ospina, S., Ocampo-Peñuela, N., & Parra, J. L. (2023). *Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, Atlapetes blancae (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Colombia.



Grupo de Investigación Ecología y Evolución de Vertebrados.



Biblioteca Seccional Oriente (El Carmen de Viboral)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Adriana Echavarría Isaza.

Jefe departamento: Ana Esperanza Franco.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi madre, sin la cual no hubiese podido alcanzar este sueño y a Carolina Gómez, donde sea que te encuentres amiga, sé que estarías muy feliz al verme culminar esta etapa.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi madre, mi familia y mi pareja, sin las cuales no hubiese sido posible cursar toda mi carrera. A mis asesores, Natalia Ocampo Peñuela y Juan Luis Parra, quienes fueron grandes guías en este proceso. También, al Proyecto Atlapetes por la oportunidad de trabajar con ellos, a su coordinador Sergio Chaparro Herrera por estar siempre presto a ayudarme y brindarme toda la información que le solicitaba durante este largo proceso. Al Instituto de Biología y a la Universidad de Antioquia por crear un valioso espacio para la formación académica y científica.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
1. Introducción	9
2. Metodología	11
2.1 Especie de estudio	11
2.2 Área de estudio	12
2.3 Parches de hábitat idóneos	14
2.4 Matriz de resistencia	15
2.5 Fragmentación y conectividad	16
3. Resultados	18
3.1 Mapa de hábitat idóneo para <i>A. blancae</i>	18
3.2 Matriz de resistencia	20
3.3 Fragmentación	21
3.4 Conectividad	23
3.4.1 Índice Integral de conectividad	23
4. Discusión	31
Referencias	35

Lista de tablas

Tabla 1: Valores de resistencia (0 sin resistencia, 5 máxima resistencia) para cada capa utilizada (capa de usos del suelo – ESRI 2021, capa de carreteras, y capa de temperatura promedio anual).

Tabla 2: Remuestreo de ESRI 2021 a diferentes resoluciones y umbrales de hábitat idóneo para cada resolución con las respectivas tasas de omisión.

Tabla 3: Resultados de las métricas del paisaje: el área de los parches, el índice de forma o área efectiva de red, con la función MK_Fragmentación de Makurhini.

Lista de figuras

Figura 1: Área de estudio: Altiplano Norte de Antioquia delimitado al sur por el Valle de Aburrá (Medellín), al occidente por el Río Cauca y al norte y oriente por las estribaciones de la cordillera Central. Los diferentes colores representan rangos de elevación entre 1800 y 3400m.

Figura 2: Parches de hábitat idóneo con base en tres diferentes umbrales. En verde se ven los respectivos nodos con cada umbral aplicado. A) Nodos con mínimo 1.5 ha de hábitat idóneo por pixel. B) Nodos con mínimo 3.75 ha de hábitat idóneo por pixel. C) Nodos con mínimo 10 ha de hábitat idóneo por pixel. Los puntos representan los registros que hay para la especie. En amarillo aquellos puntos de presencia que están dentro del hábitat idóneo y en rojo aquellos que no.

Figura 3: Mapa de hábitat para el Gorrión-Montés Paisa (*A. blancae*). Las diferentes gamas de rojo representan las áreas de los nodos

Figura 4: Matriz de resistencia resultado de sumar las capas: ESRI 2021, Carreteras de Colombia y Temperatura media anual. Los colores representan valores de resistencia de 0 - 12, en donde 12 corresponde a la resistencia más alta. Los recuadros A y B muestran un zoom en Santa Rosa de Osos y Gómez Plata para visualizar mejor los valores de resistencia alta.

Figura 5: Resultados del índice de forma para cada nodo, utilizando la función MK_Fragmentation de Makurhini. Los diferentes colores muestran el valor del índice de forma para cada nodo donde blanco son los valores más bajos y verde oscuro los más altos. **Figura 6:** Fracciones de dPC para las diferentes distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F) con las diferentes distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del dPC de menor (amarillo) a mayor (rojo).

Figura 7: Mapa de los nodos más importantes para mantener la conectividad del Gorrión-Montés Paisa, *A. blancae* en el Altiplano Norte de Antioquia. Según los resultados del dIIC

y dPC.

Figura 8: Fracciones de dPC_{intra} para los diferentes umbrales de distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F), con las respectivas distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del dPC_{intra} de menor (amarillo) a mayor (verde).

Figura 9: Fracciones de dPC_{connector} para las diferentes distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F, con las respectivas distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del dPC_{connector} de menor (amarillo) a mayor (verde-azul).

Figura 10: Mapa de conectividad de hábitat utilizando todas las posibles rutas. Para cada escenario, A, B y C se calculó la corriente acumulada con radios de 0.5, 5 y 25 km respectivamente. Los colores son diferentes valores de corriente acumulada, siendo el amarillo el de mayor corriente acumulada y el negro el de menor.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Resumen

El Montañerito Paisa, *Atlapetes blancae*, es un ave endémica del Altiplano Norte de Antioquia que está en Peligro Crítico (CR) de extinción según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Entre las causas de su estado, se presume que sus poblaciones son muy pequeñas y su hábitat se encuentra amenazado por la expansión agrícola, y la alta fragmentación, lo cual conlleva a una baja conectividad. Esta ave se ha registrado en vegetación secundaria como helechos, matorrales y fragmentos en sucesión, coberturas que han sido muy poco estudiadas para modelar su conectividad en un paisaje. En este trabajo identificamos los parches de hábitat idóneo para la especie en el Altiplano, utilizando un mapa de coberturas del suelo y conocimiento de expertos sobre el uso de hábitat de *A. blancae*. Estos parches posteriormente fueron utilizados como los nodos a conectar bajo varios escenarios de conectividad. Para modelar la conectividad estructural y funcional, se utilizó una matriz de resistencia con base en tres capas: coberturas del suelo, carreteras y temperatura promedio anual, y se asumieron varias distancias de dispersión. Calculamos el índice de marginalidad, la probabilidad de conexión, y una medida de conectividad basada en teoría de circuitos para estimar la conectividad del Altiplano y la contribución individual de cada parche. También calculamos varios métricos de fragmentación del hábitat en el área de estudio como el área efectiva de red y el índice de forma. Encontramos un alto grado de fragmentación en el hábitat, de 19,9 km² de un total de 600.42km² e identificamos los nodos más importantes para el mantenimiento y mejoramiento de la conectividad de la especie en el Altiplano. Con los resultados, proponemos diferentes acciones de conservación para evitar la extinción de la especie.

Palabras clave: fragmentación, resistencia, paisaje, aves, andes, conectividad, conservación, endémico.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Abstract

The Montañerito Paisa, *Atlapetes blancae*, is an endemic bird of the Northern Highlands of Antioquia that is in Critical Danger (CD) of extinction according to the International Union for the Conservation of Nature (IUCN). Among the causes of their state, it is presumed that their populations are very small and their habitat is threatened by agricultural expansion, and high fragmentation, which leads to low connectivity. This bird has been recorded in secondary vegetation such as ferns, thickets and fragments in succession, coverings that have been little studied to model its connectivity in a landscape. In this paper, we identified the patches of habitat suitable for the species in the Highlands, using a map of soil coverages and expert knowledge on the use of *A. blancae* habitat. These patches were later used as nodes to connect under various connectivity scenarios. To model structural and functional connectivity, a resistance matrix based on three layers was used: soil coverings, roads and average annual temperature, and several dispersion distances were assumed. We calculated the marginality index, the probability of connection, and a connectivity measure based on circuit theory to estimate the connectivity of the Highlands and the individual contribution of each patch. We also calculated various habitat fragmentation metrics in the study area such as the effective network area and the form index. We found a high degree of fragmentation in the habitat, of 19.9 km² of a total of 600.42 km² and identified the most important nodes for the maintenance and improvement of the connectivity of the species in the Highlands. With the results, we propose different conservation actions to avoid the extinction of the species.

Keywords: fragmentation, resistance, landscape, birds, andes, connectivity, conservation, endemic.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

1. Introducción

Los ecosistemas del planeta han sido transformados por actividades antrópicas, generando las cinco principales amenazas a la biodiversidad: la destrucción del hábitat, la sobreexplotación, la contaminación, el cambio climático y las especies invasoras (Badii et al., 2015; Bellard et al., 2012; Leclerc et al., 2020). Estos problemas, impactan negativamente la dinámica de las especies a diferentes escalas, pero son más fuertes en especies con rangos de distribución reducida y poblaciones pequeñas, pues estos son más susceptibles a la extinción (Flanagan et al., 2005 & Isik, 2011). Este es el caso del Gorrión-Montés Paisa *Atlapetes blancae*, Donegan (2007), un ave endémica del Altiplano Norte en el Departamento de Antioquia, la cual cuenta con pocos individuos, una distribución limitada y se enfrenta a la destrucción de su hábitat (Chaparro-Herrera, 2014; Correa et al., 2019). Estos factores pueden estar disminuyendo la conectividad de la especie, entendida como el grado en que el paisaje facilita el movimiento de organismos entre parcelas de recursos (Taylor et al., 1993), permitiendo el flujo de genes entre poblaciones y la recolonización de parches de recursos (Gurrutxaga & Lozano, 2012; Taylor et al., 1993). Dentro de esta, existen dos tipos de conectividad: la conectividad estructural, que se basa en la disposición física de los elementos del paisaje y la conectividad funcional, que se basa en la respuesta de los organismos a la estructura del paisaje (Taylor et al., 2006). Esta última es crucial para enfocar esfuerzos de conservación (Bowne & Bowers 2004; Vogt et al., 2009) sin embargo requiere de información que para la mayoría de especies no existe, como datos acerca del movimiento de los individuos a través del paisaje.

Según varios autores (Januchowski-Hartley et al., 2013; Tischendorf & Fahrig, 2000; Nikolakaki, 2004), los factores que afectan considerablemente la conectividad ecológica de organismos terrestres son la fragmentación, la pérdida del hábitat y los diferentes usos del suelo, debido a que estos conllevan a la creación de nuevas barreras que impiden el movimiento de los organismos. Por ejemplo, la construcción de carreteras trae consigo impactos negativos por la destrucción de hábitat y por su efecto de fragmentación. Si debido a cambios en el uso del suelo, parches idóneos quedan más distanciados de lo que permite la capacidad de dispersión de los organismos, se producirá una reducción de la conectividad (Almenar et al., 2019). La conectividad

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

es crucial para la conservación de la biodiversidad y la supervivencia de las poblaciones, ya que permite el flujo genético entre estas y provee la posibilidad de colonizar parches nuevos de hábitat (Fahrig & Merriam, 1985; Gurrutxaga & Lozano, 2012; Taylor et al., 1993). La conectividad puede ser informativa para la toma de decisiones de conservación, como en restauración, diseño de redes de reserva, control de especies invasoras y administración de recursos fronterizos (Kool, 2013). Además, la restauración de la conectividad ayudará a que las especies puedan responder mejor al cambio climático a medida que cambian las condiciones locales (Hilty et al., 2020; Opdam & Wascher, 2004).

En el caso particular de *A. blancae*, la conectividad puede ser crucial para la protección y sostenibilidad de la especie en el corto y largo plazo. Varios estudios muestran que la especie utiliza vegetación secundaria como matorrales nativos remanentes y cultivos asociados a áreas naturales, donde se cree que existen un poco más de 50 individuos en todo el rango de distribución, un número poblacional muy bajo (Correa et al., 2019; Valencia et al., 2019; Renjifo et al., 2014; Chaparro-Herrera et al., 2021). La región del altiplano ha sido fuertemente transformada, desde su poblamiento por indígenas, pasando por una época de explotación minera agresiva (Arango-López, 2013), hasta su fase más reciente caracterizada por un alto rendimiento en la producción de leche y sus derivados, ganadería y agricultura (Administración, 2020; Correa et al., 2019; Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 2008). Es posible entonces que la afectación del hábitat natural de la especie haya ocurrido desde hace ya varios cientos de años. El área de distribución de esta especie es muy restringida, incluyendo varias áreas del Altiplano Norte de Antioquia como San Pedro de los Milagros, Santa Rosa de Osos y Yarumal (BirdLife International, 2021; Correa et al., 2019; Renjifo et al., 2014; Valencia et al., 2019). La situación actual de esta especie es crítica y estudios que aporten al conocimiento de sus amenazas e identifiquen alternativas de conservación son necesarios.

Uno de los insumos más importantes para la planeación de la conservación de esta especie son mapas de su hábitat idóneo y de conectividad. A pesar de que se ha caracterizado el hábitat de la especie de manera cualitativa, no se han realizado ejercicios que permitan estimar la cantidad y distribución del hábitat de la especie. Teniendo en cuenta la estructura del paisaje y la capacidad de dispersión de las especies, podríamos calcular la conectividad funcional. Los métodos para

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

medir la conectividad funcional están divididos en métricas de conectividad potencial y actual que requieren múltiples datos y detallan cómo es la dinámica espacial de los sistemas ecológicos (Ruiz-Gómez, 2010). Para la conectividad actual, se utilizan métricas que miden la dispersión, inmigración y emigración actual y las metodologías más usadas incluyen: 1) el uso de datos genéticos para explorar las consecuencias demográficas de la conectividad, 2) trazar las vías de movimiento de los animales por medio de observaciones o radiolocalización, 3) captura y recaptura de individuos y 4) medidas de las tasas de migración e inmigración a nivel de parches (Ruiz-Gómez, 2010). La conectividad potencial se mide por medio del área de influencia y métricas en función de la incidencia utilizando datos de movilidad, pero estos son más complejos y demandan un mayor número de datos. Un método que se emplea constantemente, debido a su facilidad, es la teoría de grafos, que incorpora métricas de la conectividad estructural y la dispersión de la especie. Como resultado, se obtiene un mapa que permite visualizar la unión entre los distintos relictos de hábitat que están a una distancia ya sea menor o igual al umbral de movilidad de la especie (Ruiz-Gómez, 2010).

En el presente estudio, se desarrolló un modelo de conectividad para *A. blancae*, con el fin de evaluar lugares importantes para el mantenimiento del flujo génico entre poblaciones y la posibilidad de colonizar nuevos parches dentro de su rango de distribución y hacer recomendaciones para su conservación. Dada la situación actual del Altiplano Norte de Antioquia, esperamos que la distribución del hábitat de la especie se encuentre altamente fragmentada (i.e., fragmentos de pequeño y mediano tamaño) y que la conectividad funcional de la especie sea baja (i.e., fragmentos distantes entre sí). Para apoyar acciones de conservación de la especie, se identificaron áreas claves para la conservación o restauración del hábitat de *A. blancae*, que permitan proponer medidas que aumenten su conectividad y promuevan su conservación.

2. Metodología

2.1 Especie de estudio

A. blancae es un ave endémica de la zona Norte del dpto. Antioquia, más conocida como el Altiplano Norte, redescubierta en el año 2018, en la vereda Cerezales del Municipio de San

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Pedro de los Milagros, dpto. Antioquia, después de 47 años de haber sido colectada (Correa et al., 2019) y descrita por primera vez en 2007 (Donegan, 2007). Actualmente, está en la categoría de Peligro Crítico (CR), según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), debido a la pérdida de hábitat nativo y su presumible reducción del tamaño poblacional (BirdLife International, 2021; Chaparro-Herrera, 2014). Se presumía que los números poblacionales rondaban por los 50 individuos (Renjifo et al., 2014) pero estudios recientes indican que al menos el doble de individuos existe actualmente en un rango de distribución que cubre una extensa zona del altiplano (Valencia et al., 2019, S. Chaparro, com. pers). Además de su bajo tamaño poblacional, es posible que la especie enfrente procesos de aislamiento entre poblaciones locales y endogamia debido a la baja conectividad producto de la fragmentación (Nietlisbach et al., 2017; Love-Stowell et al., 2017; Hedrick & Garcia-Dorado, 2016).

2.2 Área de estudio

El Altiplano Norte de Antioquia (también llamado Altiplano de Santa Rosa de Osos) se encuentra al norte de la ciudad de Medellín sobre la cordillera Central de los Andes. A esta región pertenecen varios municipios: San Pedro de los Milagros, Yarumal, Entrerriós, Don Matías, Santa Rosa de Osos, Carolina del Príncipe, San José de la Montaña, Belmira, Gómez Plata, Angostura y San Andrés de Cuerquia. Seis de estos municipios (San Pedro de los Milagros, Santa Rosa de Osos, Yarumal, San Andrés de Cuerquia y Angostura) tienen registros de observaciones de *A. blancae* (Correa et al., 2019 & Valencia et al., 2019; Chaparro et al., 2021). El Altiplano Norte de Antioquia, es una región que ha sufrido grandes transformaciones con un aumento reciente (desde los 90s) en la productividad de la industria agrícola y lechera (Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 2008). Debido al uso intensivo de los suelos y el recurso hídrico, se han generado cambios en los patrones de distribución espacial del uso de suelo, de los tipos de coberturas vegetales, las viviendas y construcciones agroindustriales tales como galpones, porquerizas y otros, además, de una evidente transformación paisajística debido al desarrollo de una red terciaria de carreteras, que se ha densificado (Correa et al., 2019; Valencia et al., 2019; Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 2008). Estos factores anteriores, han contribuido a la fragmentación del hábitat en la

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

región y posiblemente generando una pérdida de la conectividad (Valencia et al., 2019; Administración, 2020; Correa et al., 2019).

Para la delimitación del área de estudio, utilizamos un modelo de elevación digital para Colombia (Jarvis et al., 2008), a una resolución espacial de 90m, donde se delimitó el Altiplano Norte de Antioquia entre los 1800-3400 m (Figura 1).

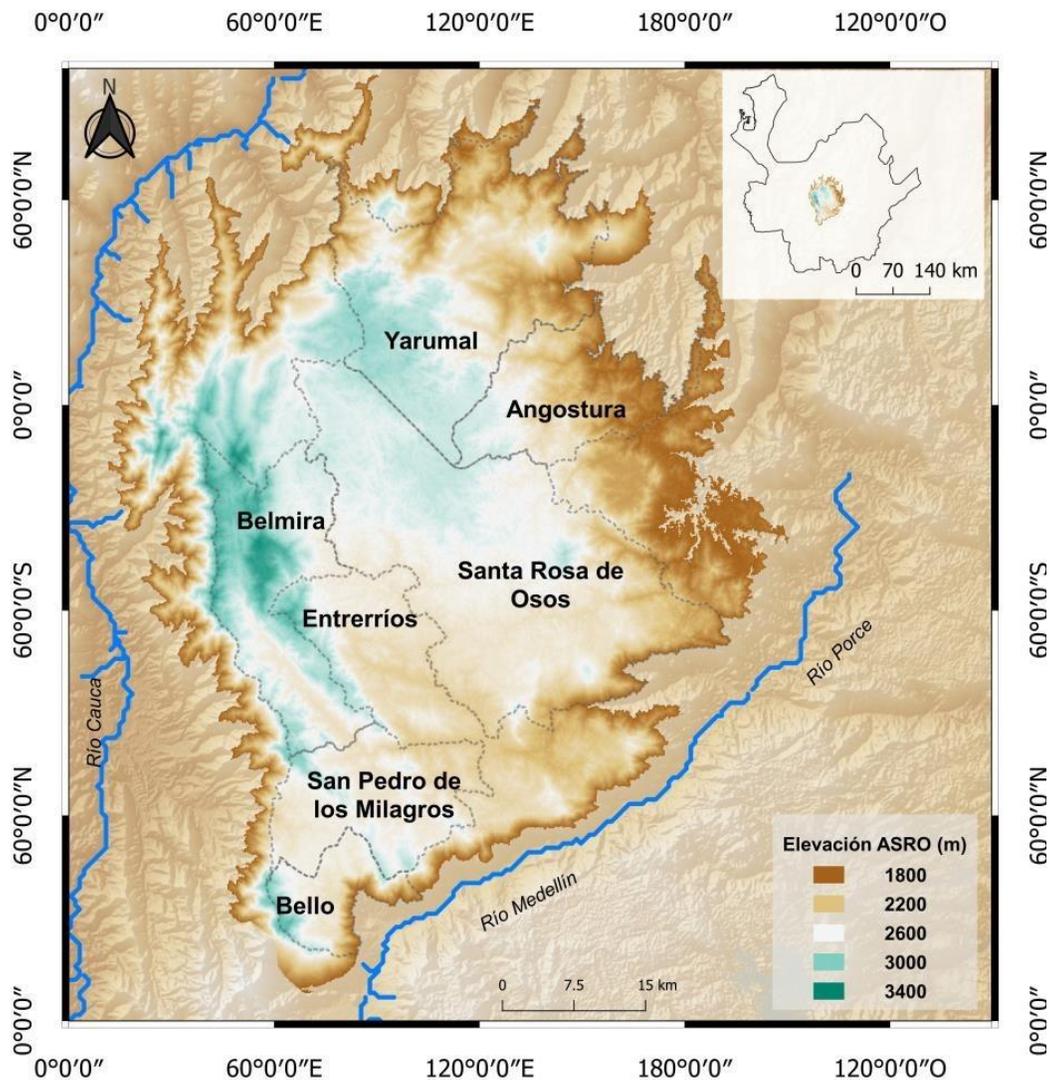


Figura 1: Área de estudio: Altiplano Norte de Antioquia delimitado al sur por el Valle de Aburrá (Medellín), al occidente por el Río Cauca y al norte y oriente por las estribaciones de la cordillera Central. Los diferentes colores representan rangos de elevación entre 1800 y 3400m.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

2.3 Parches de hábitat idóneos

Generamos un mapa de parches de hábitat idóneos según los tipos de coberturas de vegetación reportadas para la especie en la literatura, y utilizando criterios de experto (Sergio Chaparro). Como referencia, se utilizó un ráster de coberturas del suelo, generado por ESRI a una resolución espacial de 10m para el año 2021 (Karra et al., 2021), el cual fue recortado al área de estudio (Anexo 1). Este mapa contiene 10 tipos de coberturas (ver Anexos 1 y 2), entre las cuales, se identificaron como idóneas para la especie “Cultivos” y “Arbustal/Matorral” entre los 2400 y 3000 m de elevación (Correa et al., 2019 & Valencia et al., 2019; Chaparro et al., 2021). Debido a la alta resolución espacial de este mapa, realizamos remuestreos a varios tamaños de celda (100, 250 y 500 m) por medio de la función `aggregate` del paquete `Terra` en R, utilizando la operación suma para todas las celdas con cobertura idónea, de manera que el valor asignado a una nueva celda correspondía al número de celdas de 10 m de las dos categorías de interés (5 y 6) al interior de cada celda del nuevo tamaño. Por último, se eliminaron parches de vegetación idónea hacia el flanco Nor-Oriental, pues según estudios adelantados por el Proyecto Atlapetes, aún no publicados, la especie no se encuentra en ese lugar. También, nos basamos en los esfuerzos de muestreo realizados por el Proyecto Atlapetes hacia ese flanco y la especie no se ha registrado allí.

Los modelos de conectividad utilizan generalmente dos insumos, una matriz de resistencia y los nodos a conectar. Para este caso, se utilizaron los parches de hábitat idóneo como nodos. Para convertir los mapas donde el valor de cada celda indica el área de vegetación idónea al interior, a celdas binarias (1 o 0, indicando parche idóneo o no, respectivamente), propusimos tres umbrales, que indicarían la cantidad de vegetación idónea mínima para poder considerar un parche con hábitat suficiente para la especie: 1.5, 3.5, y 10 ha. Elegimos entre las tres resoluciones espaciales (100, 250 y 500 m) y tres umbrales, aquella combinación que presentara la menor tasa de omisión (la proporción del total de puntos de registro de presencia de *A. blancae* que queda por fuera de las coberturas idóneas). Finalmente, utilizamos el mapa seleccionado para los análisis de fragmentación y conectividad.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

2.4 Matriz de resistencia

Para la construcción de la matriz de resistencia, como un modelo del potencial movimiento de individuos de la especie a través del paisaje, se utilizaron tres insumos: las coberturas de vegetación de ESRI 2021 (Karra et al., 2021), un mapa de carreteras (DIVAGIS, 2020) y la temperatura media anual obtenida de la base de datos de Worldclim (Hijmans et al., 2005). Todas las capas fueron reclasificadas en QGIS para asignarles un valor de resistencia y fueron remuestreadas a una resolución espacial de 100 m. El valor de resistencia para cada categoría de cada capa fue asignado entre 0 y 5, donde valores de 0 significan que no hay resistencia y valores de 5 indican la máxima resistencia (Tabla 1). Una vez se clasificaron las capas, estas fueron sumadas y se generó un ráster con el acumulado de todos los valores de resistencia (0-12).

Tabla 1

Valores de resistencia (0 sin resistencia, 5 máxima resistencia) para cada capa utilizada (capa de usos del suelo – ESRI 2021, capa de carreteras, y capa de temperatura promedio anual).

Coberturas	Resistencia
PARA ESRI 2021	
1 Agua	5
2 Árboles	3
3 Hierba	4
4 Vegetación inundada	2
5 Cultivos	0
6 Arbustal / Matorral	0
7 Área construida	5
8 Suelos desnudos	4
9 Nieve / Hielo	5
10 Nubes	5
PARA CARRETERAS	
Vía secundaria	4

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Vía primaria

5

2.5 Fragmentación y conectividad

La fragmentación consiste en cortar un hábitat en fragmentos pequeños, lo cual afectará las dinámicas poblacionales que existen, creando consecuencias que afectan los procesos biológicos como la conectividad (Gurrutxaga & Lozano, 2006; Taylor et al., 1993). Para caracterizar el estado de fragmentación actual del área de estudio, calculamos diferentes métricas del paisaje como la distribución de áreas de los parches, el número de parches, el índice de forma (relaciona la forma de cada fragmento con referencia a un círculo de la misma área, y oscila entre 1 – forma sencilla similar a círculo – e infinito – forma compleja muy diferente a un círculo), y el tamaño efectivo de la red (un índice que indica la fragmentación de un paisaje y es proporcional a la probabilidad de que dos puntos aleatorios estén conectados; este índice tiene unidades de área (hectáreas) que representan la configuración espacial de los parches y oscila entre el tamaño de una celda/área de estudio al área de estudio), mediante la función `MK_Fragmentation` del paquete `Makurhini`. Para correr esta función, establecimos una distancia al borde de 0, pues para el tipo de vegetación utilizada por esta especie, el borde del parche es también considerado idóneo, y un área mínima de parche de 1 km².

Para obtener los estimados de conectividad dentro del área de estudio, calculamos dos métricos ampliamente utilizados (Saura & Rubio 2010, Pascual-Hortal & Saura 2006): el índice integral de conectividad (IIC) y los índices de probabilidad de conectividad (PC), para cada uno de los parches de hábitat idóneo utilizando varias funciones del paquete `Makurhini` (Godínez-Gómez & Correa-Ayram, 2020) en R v4.2.2 (R Core Team, 2020). El IIC es un métrico de conectividad estructural del paisaje que tiene en cuenta el área de cada par de parches, el número de enlaces entre cada par de parches y el área total del paisaje para estimar la conectividad (Pascual-Hortal & Saura 2006). Este índice puede ser calculado para cada parche como la contribución de cada uno a la conectividad integral del paisaje (dIIC), es decir, cómo se ve afectada la conectividad del paisaje al eliminar un parche particular y va de 0 – 100 (Avon & Bergés, 2016; Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Rubio, 2010). La probabilidad de conectividad (PC) es un métrico de conectividad funcional que refleja la probabilidad de que dos puntos ubicados aleatoriamente en el

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

área de estudio se encuentren en parches de hábitat idóneo que estén conectados entre sí (interconectadas) dado un conjunto de n parches de hábitat y los vínculos (conexiones directas) entre ellos (Avon & Bergés, 2016; Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Rubio, 2010). Al igual que con el IIC, con la PC se usa la fracción dPC para calcular la contribución a la conectividad general del hábitat de un parche particular (Avon & Bergés, 2016; Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Rubio, 2010). Además del dPC, calculamos las fracciones dPC_{intra} y dPC_{connector}, estas fracciones también tiene valores entre 0 - 100. La primera, nos refleja cuál es la contribución de cada parche a la intra-conectividad, es decir, cual es el grado de conectividad dentro de cada parche, sin tener en cuenta los enlaces hacia otros parches (Saura & Rubio, 2010). La segunda, corresponde a los nodos trampolín, la cual nos dice que tan importante es un parche en conectar otros parches. Para estimar el dIIC y el dPC y sus derivados, utilizamos la función MK_dPCIIC de Makurhini (Gurrutxaga et al., 2011; Saura et al., 2014 & Saura & Rubio, 2010).

La función MK_Fragmentation de Makurhini, permite calcular las estadísticas de fragmentación del paisaje y de parche (Godínez-Gómez & Correa-Ayram, 2020). Se obtienen dos datos, la primera “Summary landscape metrics” o resumen de las métricas del paisaje, como la distribución de áreas de los parches y el número de parches (Tabla 3). La segunda salida “Patch statistics shapefile”, o estadísticas de parche, un archivo en formato vector que tiene el índice de forma de los parches (Figura 5). Por otro lado, es posible calcular las fracciones del Índice Integral de Conectividad (IIC) y la Probabilidad de Conectividad (PC) usando distancias de dispersión por medio de la función MK_dPCIIC de Makurhini. Para nuestro caso calculamos las fracciones dIIC (Anexo 3), dPC (Figura 6), dPC_{intra} (Figura 8) y dPC_{connector} (Figura 9). Para este cálculo, se utilizaron como insumos el vector de los nodos a conectar y el ráster de resistencia (Godínez-Gómez & Correa-Ayram, 2020). Se utilizaron tres distancias de dispersión (Threshold), 500, 5.000 y 25.000 m para dos de los métodos que utiliza la función para calcular la conectividad, estos son: distancias de Borde (Edge) y distancias de Menor Costo (Least-cost). De esta manera se obtienen dos escenarios en donde se prueban las tres distancias de dispersión para el ave para cada fracción de IIC y PC calculada. Por último, utilizamos un algoritmo, basado en teoría de circuitos, que calcula conectividad entre parches reconociendo todas las posibles rutas de conexión, no solamente las menos costosas o aquellas en línea recta, mediante el programa Omniscape (Landau et al.,

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

2021). Este programa utiliza el vector de nodos y el ráster de resistencia para producir un mapa de conectividad. Para ejecutar este algoritmo utilizamos radios de 0.5, 5 y 25 km.

3. Resultados

3.1 Mapa de hábitat idóneo para *A. blancae*

El mapa de parches de hábitat idóneo para *A. blancae* con mejor desempeño de acuerdo con la tasa de omisión fue el de 500 m de resolución espacial, utilizando un umbral de 1.5 ha de hábitat idóneo al interior de cada celda (tasa de omisión de ~29%; Figuras 2 y 3). De aquí en adelante esta capa se entenderá como el mapa de hábitat idóneo para la especie.

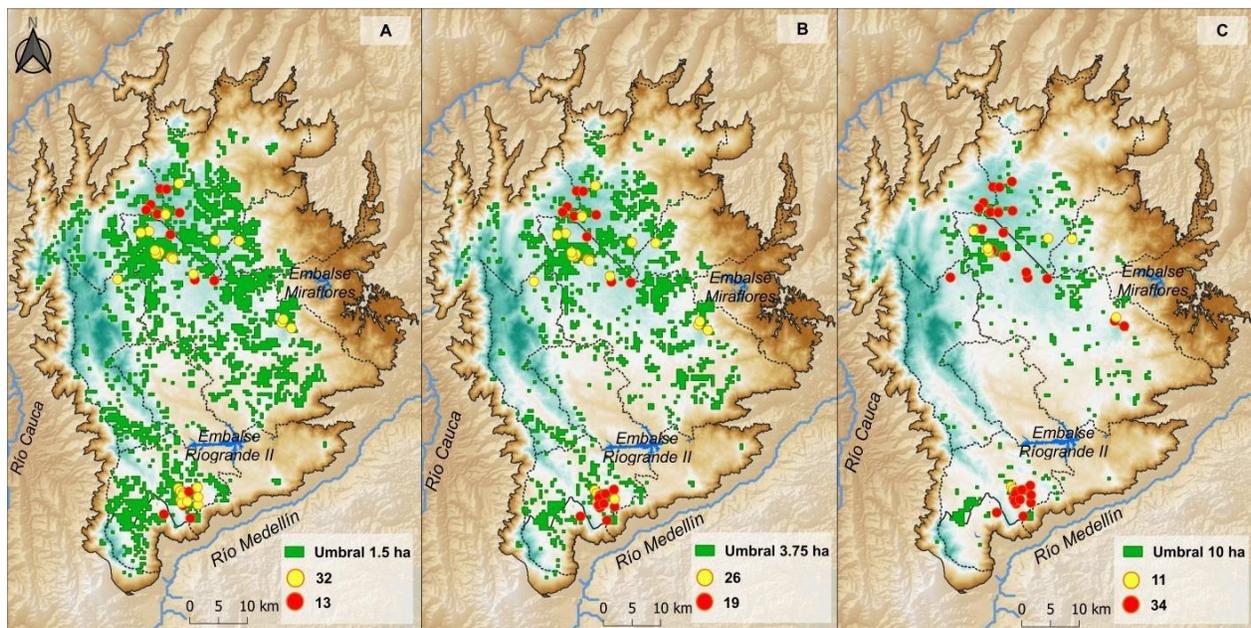


Figura 2: Parches de hábitat idóneo con base en tres diferentes umbrales. En verde se ven los respectivos nodos con cada umbral aplicado. A) Nodos con mínimo 1.5 ha de hábitat idóneo por pixel. B) Nodos con mínimo 3.75 ha de hábitat idóneo por pixel. C) Nodos con mínimo 10 ha de hábitat idóneo por pixel. Los puntos representan los registros que hay para la especie. En amarillo aquellos puntos de presencia que están dentro del hábitat idóneo y en rojo aquellos que no.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Tabla 2

Remuestreo de ESRI 2021 a diferentes resoluciones y umbrales de hábitat idóneo para cada resolución con las respectivas tasas de omisión.

Resoluciones	Puntos omitidos*		
	Nodos	Nodos 3.75ha	Nodos 10
100 m	1.5ha 22	23	ha 27
250 m	18	20	21
500 m	13	19	34
Tasa de omisión (%)			
100 m	48.8	51.1	60
250 m	40	88.8	46.6
500 m	28.8	44.4	75.5

* Puntos totales de presencia = 45

3.2 Matriz de resistencia

El mapa de resistencia indica una alta variabilidad en el área de estudio en cuanto al potencial movimiento de individuos, con una amplia zona con altos niveles de resistencia entre los municipios de Entreríos y Santa Rosa de Osos. Se observan mayormente resistencias con valores entre 4 – 6 en la matriz. Los lugares con los valores de resistencia más altos fueron las carreteras, las carreteras cerca a centros poblados y las periferias del área de estudio hacia el flanco Nororiental. Las áreas que no tienen resistencia o es muy baja, (0 -1) son aquellas definidas como hábitat idóneo para el *A. blancae*.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

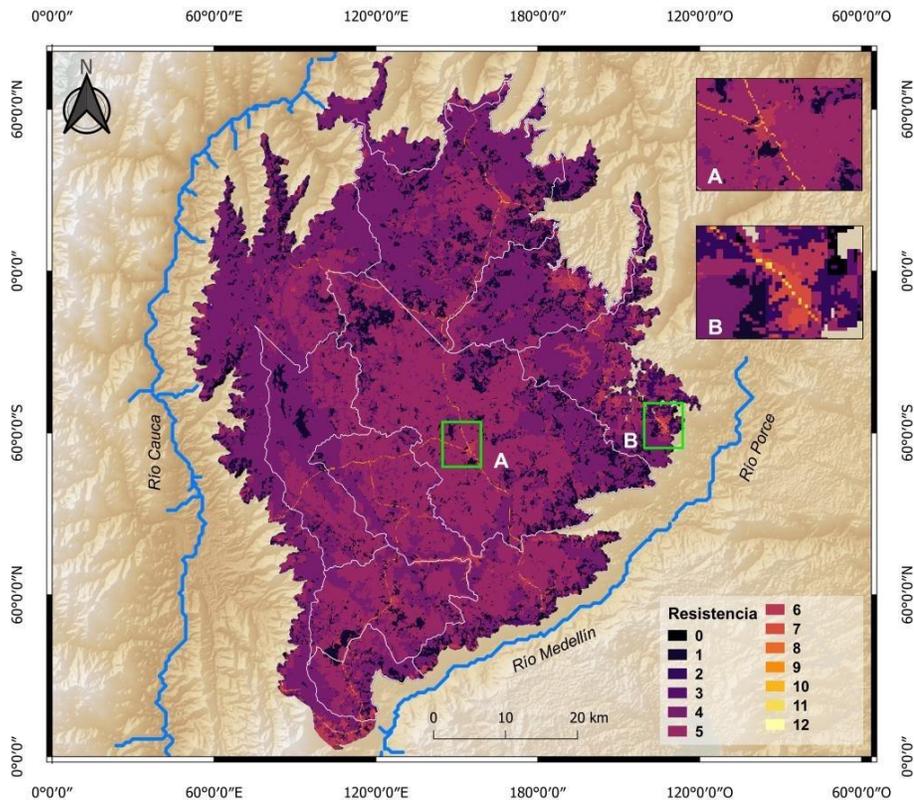


Figura 4: Matriz de resistencia resultado de sumar las capas: ESRI 2021, Carreteras de Colombia y Temperatura media anual. Los colores representan valores de resistencia de 0 - 12, en donde 12 corresponde a la resistencia más alta. Los recuadros A y B muestran un zoom en Santa Rosa de Osos y Gómez Plata para visualizar mejor los valores de resistencia alta.

3.3 Fragmentación

Según el mapa de hábitat idóneo, existen 326 parches de hábitat para la especie, los cuales representan un área total de 600 km². Varias métricas de fragmentación del paisaje pueden encontrarse en la tabla 3. El número de parches con área menor a 1km² fue de 229 (~70%) y estos representan ~14% del área total. El índice promedio de forma fue de 1.4, lo cual indica que los parches no tienen formas complejas y son más bien compactos. El tamaño efectivo de red fue de 1990 hectáreas lo cual puede interpretarse como un valor alto de fragmentación considerando que el mínimo es 25ha y el máximo es 5879 ha. El índice de forma (Figura 5) para cada nodo muestra que los parches van aumentando su complejidad de forma en relación al tamaño, donde los parches

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

pequeños (áreas < 861 ha, Figura 3) tienen formas sencillas y los más extensos (áreas > 1000 ha, Figura 3) tienen formas más complejas.

Tabla 3

Resultados de las métricas del paisaje: el área de los parches, el índice de forma o área efectiva de red, con la función MK_Fragmentación de Makurhini.

Métricas	Valores para Nodos 1.5ha
Área de parche	600 km ²
Número de parches	326
Parches < área mínima de parche	229 km ²
Parches < área mínima de parche	13.9 %
Índice de forma (promedio)	1.4924
Área efectiva de red	1990 ha

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

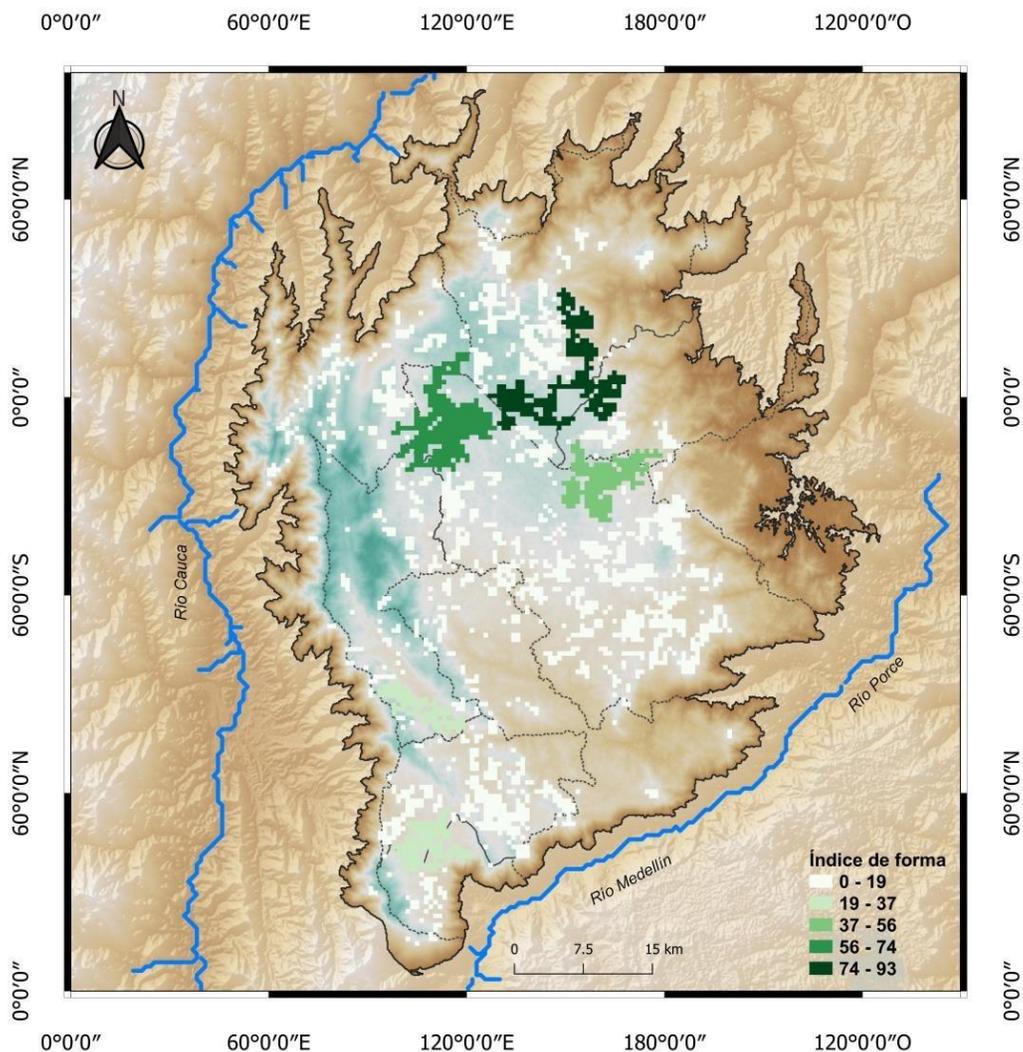


Figura 5: Resultados del índice de forma para cada nodo, utilizando la función *MK_Fragmentation* de Makurhini. Los diferentes colores muestran el valor del índice de forma para cada nodo donde blanco son los valores más bajos y verde oscuro los más altos.

3.4 Conectividad

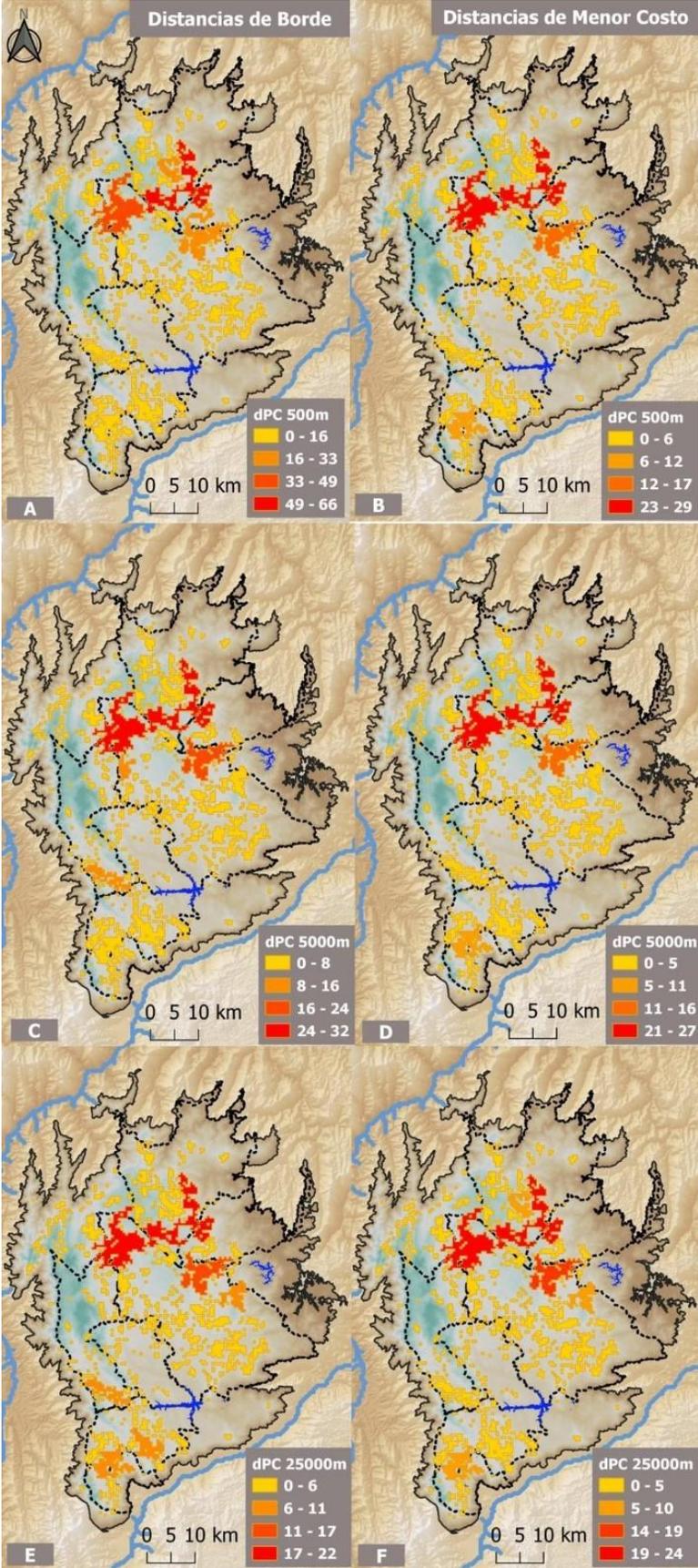
3.4.1 Índice Integral de conectividad

La contribución de cada parche a la conectividad integral del paisaje (dIIC) fue altamente variable con muchos parches de pequeño tamaño (áreas < 861 ha) realizando aportes bajos (<5%), mientras que pocos parches de gran extensión realizaron contribuciones mucho mayores (>20%);

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Anexo 3). Este resultado se vuelve más extremo (mayor contribución de parches de gran tamaño) cuando las distancias de dispersión propuestas son menores (500 vs 5000 vs 25000m) y cuando la medida de conectividad está basada en distancias euclidianas desde el borde en relación con distancias de menor costo (Anexo3). Estos resultados son muy similares a los encontrados estimando la fracción de la Probabilidad de Conectividad (dPC, Figura 6). Existen cuatro parches importantes en el Norte, ubicados entre Angostura, Santa Rosa de Osos y Yarumal (Figura 7) y tres nodos en el Sur, en Belmira, Bello y San Pedro de los Milagros que serían los más importantes para mantener la conectividad y disponibilidad de hábitat según ambos criterios.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.



Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Figura 6: Fracciones de dPC para las diferentes distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F) con las diferentes distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del dPC de menor (amarillo) a mayor (rojo).

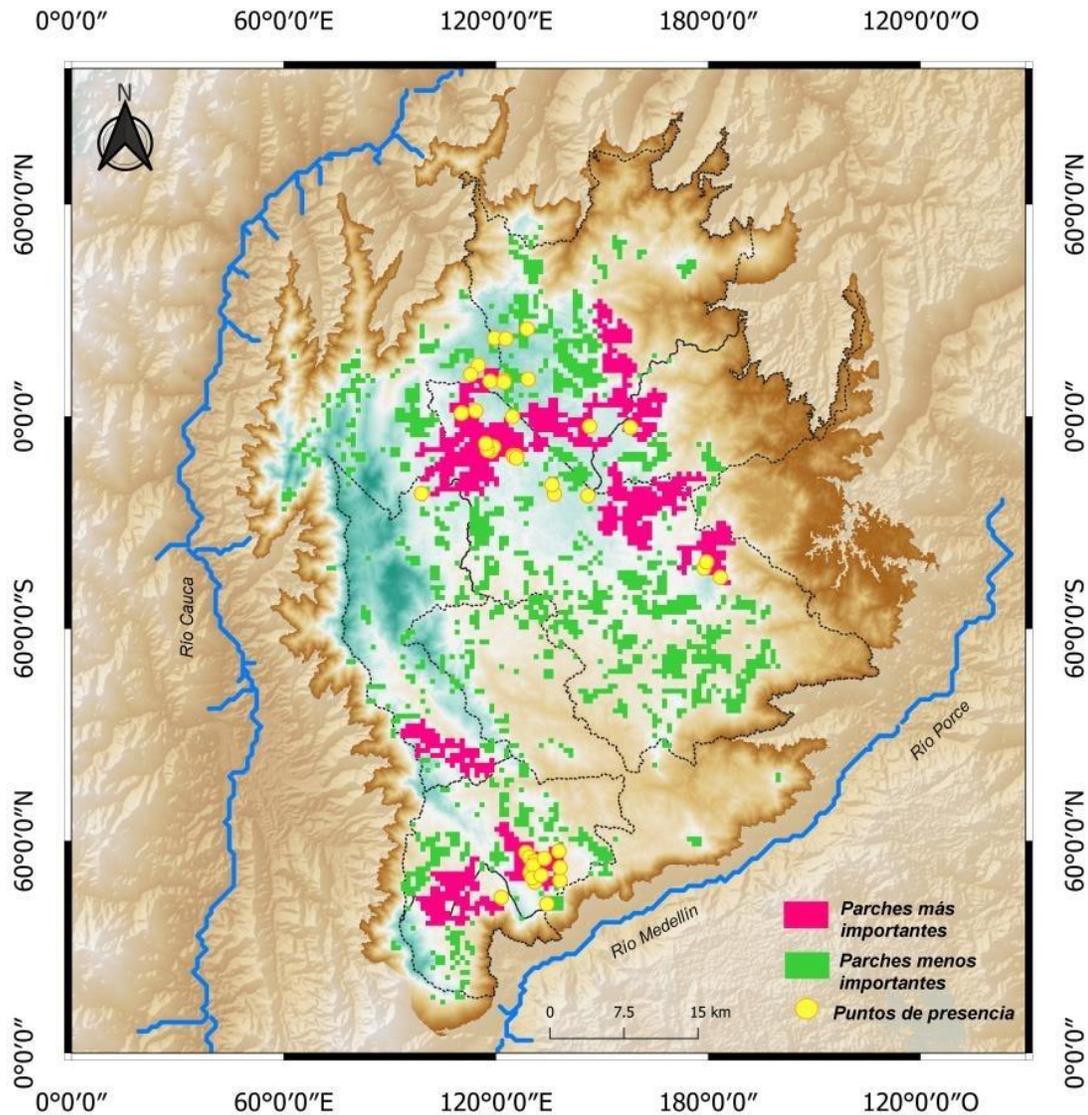


Figura 7: Mapa de los nodos más importantes para mantener la conectividad del Gorrión-Montés Paisa, *A. blancae* en el Altiplano Norte de Antioquia. Según los resultados del dIIC y dPC.

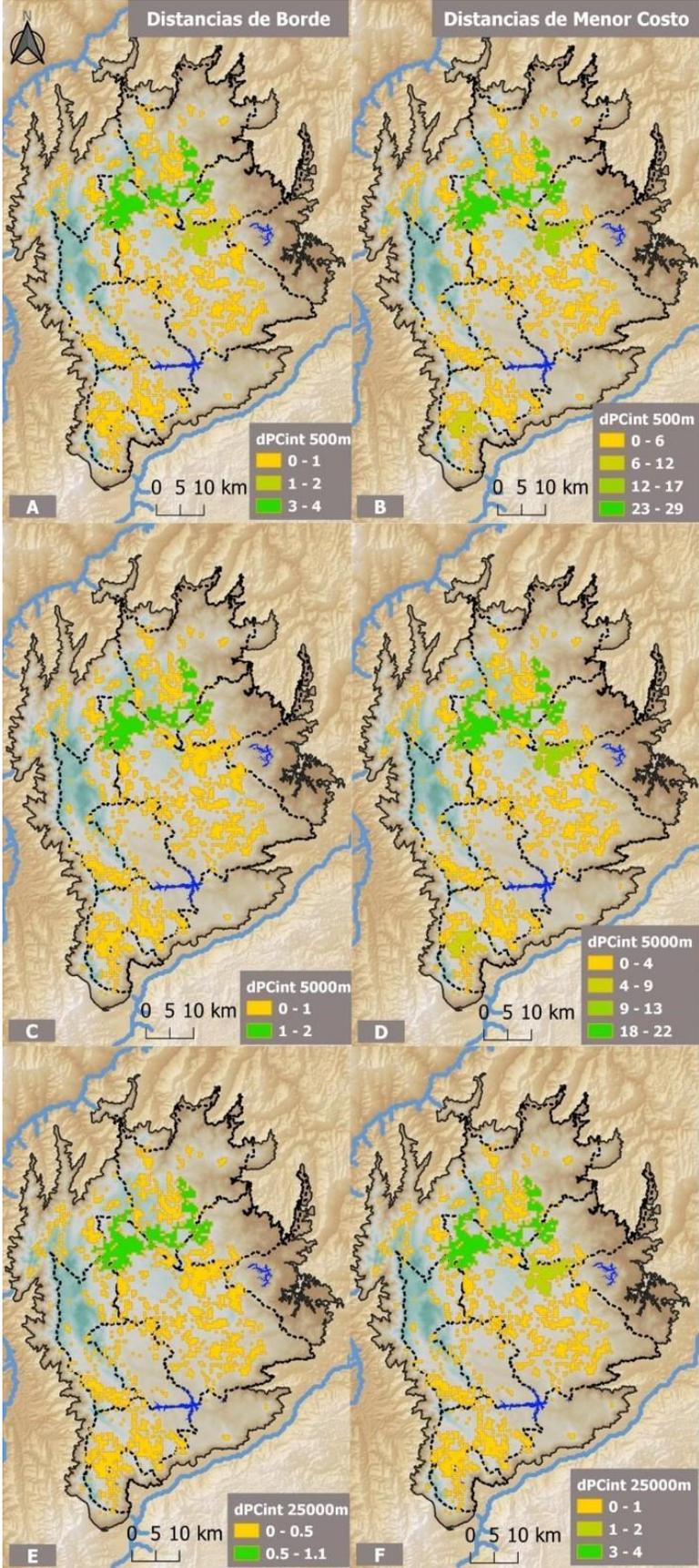
Con respecto a la probabilidad de conectividad debida a la conectividad al interior de cada parche (dPC_{intra}; Figura 8), y a la conectividad entre parches (dPC_{connector}; Figura 9), podemos notar que el aporte de ambos aspectos a la conectividad total (dPC) es bajo. El aporte de la

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

conectividad al interior de cada parche disminuye con una mayor distancia de dispersión, y usualmente es más alto con distancias de menor costo (Figura 8). El aporte de un parche particular a la conectividad de otros parches (dPCconnector) se reduce con distancias de dispersión mayores, y también es menor cuando se utilizan distancias de menor costo (Figura 9). Los parches que mejor actúan como trampolín entre otros nodos para mantener la conectividad dependen en gran parte de la distancia de dispersión y del tipo de distancia implementada. En situaciones donde la distancia de dispersión es corta (e.g., 500m), los parches que mayor aportan a la conectividad entre parches son los más grandes hacia el Norte del Altiplano, entre Santa Rosa y Yarumal para distancias desde el borde, mientras que, para distancias de menor costo, una gran cantidad de parches en el área de estudio tienen un aporte similar y muchos más parches pueden ser usados como trampolín.

En los mapas de corriente acumulada (Figura 10) que tienen en cuenta todas las posibles rutas de movimiento, indican un resultado general muy parecido a las anteriores aproximaciones, donde los parches más extensos en Santa Rosa de Osos y Yarumal, San Pedro de Los Milagros y Belmira muestran las mayores concentraciones de flujo en los escenarios B y C. Pero, cuando utilizamos un radio de 0.5km en el escenario A, muestra una conectividad muy baja para todo el paisaje.

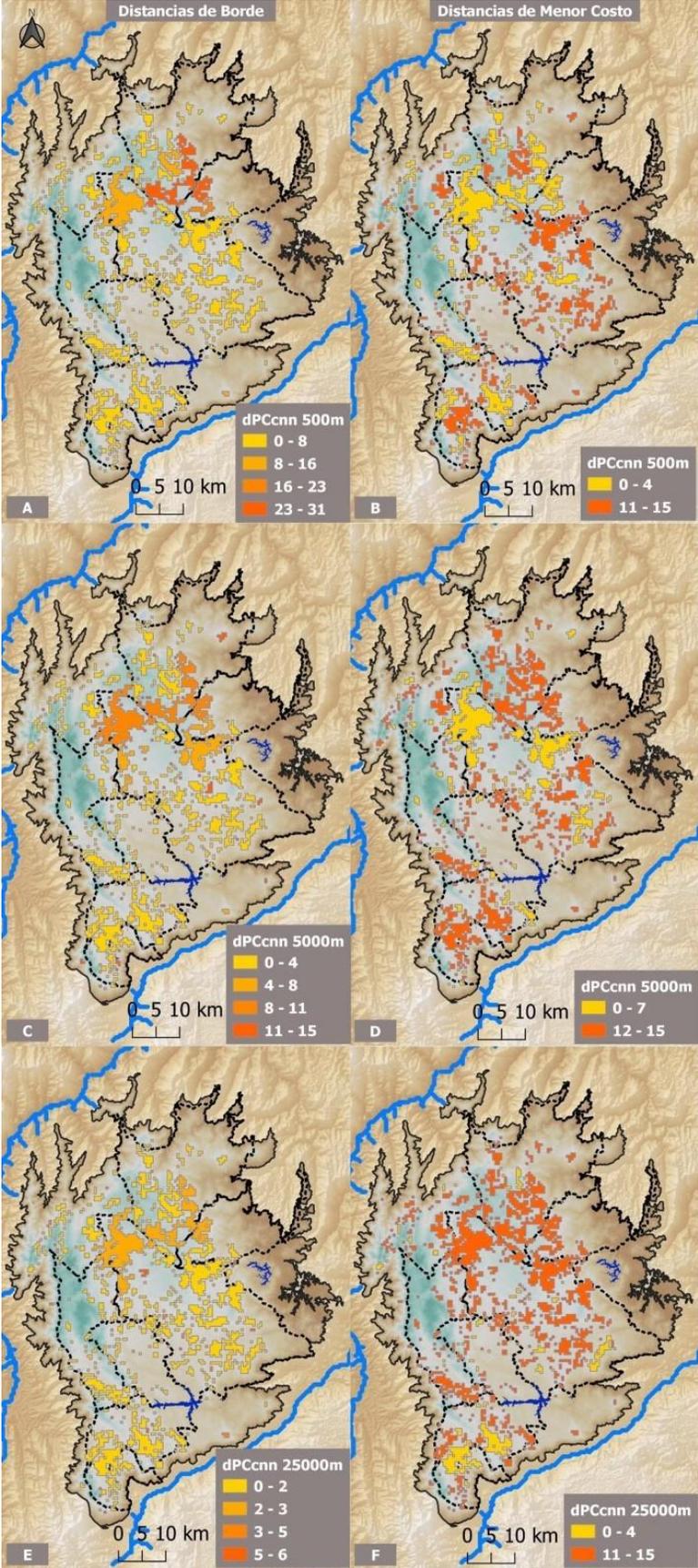
Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.



Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Figura 8: Fracciones de dPCintra para los diferentes umbrales de distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F), con las respectivas distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del dPCintra de menor (amarillo) a mayor (verde).

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.



Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Figura 9: Fracciones de $dP_{connector}$ para las diferentes distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F, con las respectivas distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del $dP_{connector}$ de menor (amarillo) a mayor (verde-azul).

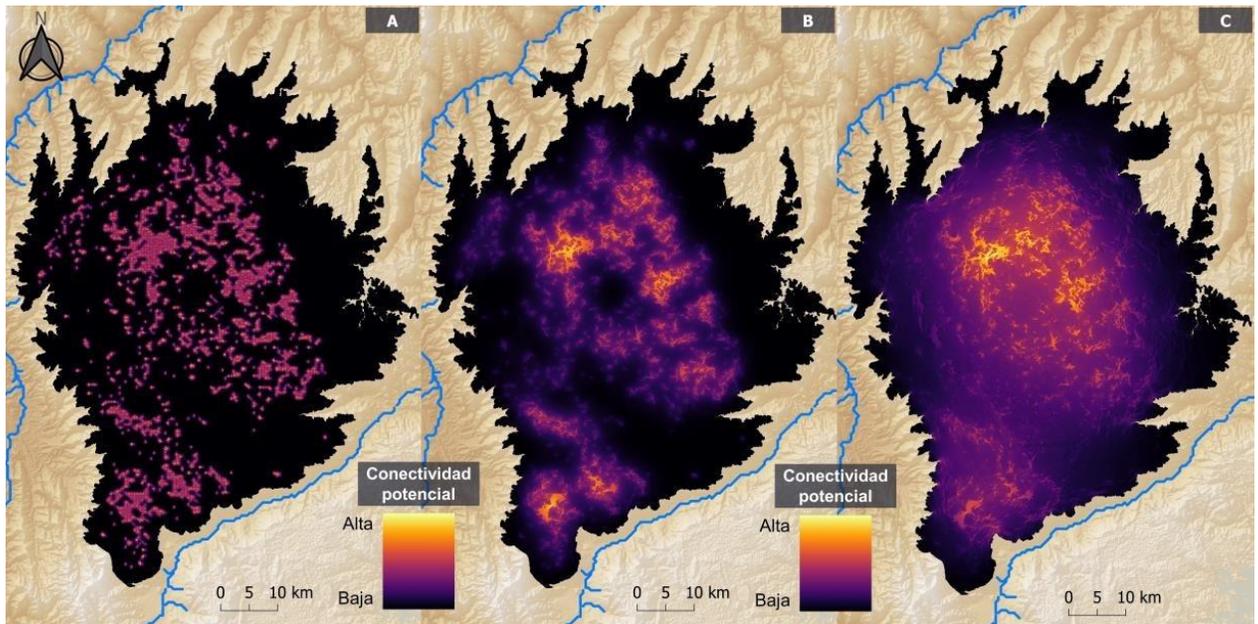


Figura 10: Mapa de conectividad de hábitat utilizando todas las posibles rutas. Para cada escenario, A, B y C se calculó la corriente acumulada con radios de 0,5, 5 y 25 km respectivamente. Los colores son diferentes valores de corriente acumulada, siendo el amarillo el de mayor corriente acumulada y el negro el de menor.

4. Discusión

El hábitat idóneo para el Gorrión-Montes Paisa se encuentra altamente fragmentado, 19,9 km² de 600km² del hábitat total (Tabla 3). Esto es consistente con lo esperado por otros autores en el ASRO (Correa et al., 2019, Valencia et al., 2019 & Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 2008) en donde el desarrollo rural y las diferentes prácticas ganaderas y agrícolas han cambiado los diferentes usos del suelo generando cambios en las coberturas vegetales y en los patrones de distribución espacial del suelo. Esta fragmentación puede resultar en disminución del tamaño poblacional de la especie (Connor et al., 2000; Bowman et al., 2002; Tischendorf et al., 2005) e incrementaría su riesgo de extinción por limitar el flujo genético, el forrajeo, el cortejo, la búsqueda de refugio y de colonización de nuevos parches.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Para la conectividad de *A. blancae*, se identificaron siete parches prioritarios (Figura 7). Cuatro de esos parches presentan registros de la especie tanto en las poblaciones del Norte, como en las del Sur del ASRO. Entre estas dos poblaciones (Norte y Sur) hay una notable disminución de la conectividad según los cálculos del dIIC y dPC, más exactamente en el municipio de Entrerriós y entre las fronteras de Don Matías, Entrerriós, Santa Rosa de Osos y San Pedro de los Milagros donde se ubica el embalse Ríogrande II, uno de los 25 embalses más importante de Antioquia con aproximadamente 11 km² de superficie (EPM, 1989). Otra barrera evidente entre estas dos poblaciones es el páramo de Belmira-Santa Ines, probablemente los bosques montanos que se encuentran en las faldas de la montaña. La baja conectividad entre estos dos grupos de parches puede estar generando una barrera entre las poblaciones. Las diferencias en los resultados de los nodos trampolín para distancias de Borde y de Menor Costo, pueden deberse a que, en parches muy extensos, la distancia del centroide al borde supera el umbral de distancia, entonces estos parches grandes > 2000ha, por ejemplo, no podrán ser usados como trampolín. Los nodos trampolín pueden ser claves para aumentar la conectividad del hábitat, ya que estos fragmentos permiten facilitar la dispersión de la especie y aumentar el área de distribución dentro del ASRO (Kramer-Schadt et al., 2011 y Leidner & Haddad, 2011) y en el paisaje existen bastantes candidatos para nodos trampolín, lo cual permitirá que *A. blancae* pueda colonizar parches de recursos y aumentar el flujo genético para disminuir la endogamia (Hedrick & Garcia-Dorado, 2016; Love-Stowell et al., 2017; Nietlisbach et al., 2017) Además, teniendo en cuenta que *A. blancae* es un ave endémica con poblaciones muy pequeñas y con niveles de ocupación bajos (Diaz-Vallejo et al., 2021; en revisión), aumentar las conexiones entre parches le ayudará a responder mejor al cambio climático a medida que cambian las condiciones locales (Hilty et al., 2020, Opdam & Wascher, 2004).

El diseño de corredores de conservación puede ser una estrategia importante para conservación del *A. blancae* en el ASRO. El método de corriente acumulada permite identificar que los lugares de mayor conectividad están en Santa Rosa de Osos y Yarumal, San Pedro de los Milagros y Belmira. Este panorama invita a explorar más parches en búsqueda de la especie hacia el flanco Nororiental en Santa Rosa, donde se ve un importante núcleo de conectividad en la Zona Norte del ASRO. En el caso de San Pedro de los Milagros, teniendo en cuenta que es un municipio

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

tan dedicado a labores agrícolas y lecheras (Administración, 2020 & Correa et al., 2019) y en donde existe un alto grado de fragmentación, es sorprendente ver que existen dos núcleos de conectividad importantes para la especie, lo cual resalta la importancia de implementar mecanismos de conservación que incluyan a las comunidades locales, pues la comprensión de los factores que afectan su municipio y la apreciación de la biodiversidad, permitirá que la comunidad se involucre en el cuidado del *A. blancae*. En el municipio de Entreríos hay varios nodos pequeños (entre 25 y 1000 ha) que se encuentran aislados (Figura 3). Estrategias como corredores biológicos, que permitan conectar estos o actividades de restauración del hábitat por medio de reforestación, con material vegetal utilizado por el *A. blancae* (por ejemplo, Chaparro et al., 2021), podrían favorecer la conectividad y permitir una posible conexión entre las poblaciones del Norte y Sur del ASRO. Es importante entonces mantener la conectividad, pues en estrategias de conservación esta es tomada en cuenta para procesos como restauración, diseño de redes de reserva, control de especies invasoras y administración de recursos fronterizos (Kool, 2013) que puedan ayudar a conservar la especie. Sin embargo, es importante también estudiar el flujo génico entre las poblaciones al Norte y Sur del ASRO para determinar el manejo de la conectividad entre estos dos grupos de parches. También, es imprescindible analizar las redes de reserva existentes (Nacionales y privadas) para entender si estas están aportando de manera efectiva a la conservación del ave y crear una ruta que permita ya sea, mantener o aumentar estas redes para disminuir la fragmentación y aumentar así la conectividad de *A. blancae*.

Es necesario entender los factores bióticos y abióticos que componen a los parches que más aportan a la conectividad y aquellos que sirven de trampolín. Esto proveerá información fundamental para la creación de estrategias de conservación y restauración del hábitat de *A. blancae*, pues podrían tomarse como referencia para aumentar la conectividad en zonas fragmentadas. Otras acciones de conservación que podrían llevarse a cabo con ayuda de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de cada Municipio del Altiplano, los Sistemas Locales de Áreas Protegidas y labores de educación ambiental, sería promover la creación de corredores biológicos. Es decir, franjas lineales de hábitat y los nodos trampolín, parches discontinuos inmersos en la matriz que conectan otros parches que de otro modo estarían aislados, los cuales se han propuesto como estrategias de gestión que permiten aumentar la conectividad en paisajes fragmentados

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

(Jepsen et al., 2005; Chetkiewicz et al., 2006). También podrían darse incentivos financieros, desde el gobierno local de cada municipio o de alguna ONG, (Donald & Evans, 2006) a las prácticas agrícolas que sean consistentes con los objetivos de conservación para *A. blancae* y que estén complementadas con educación acerca de la conservación del ave.

Este estudio puede tomarse como ejemplo, para otras especies especialistas en vegetación arbustiva como lo puede ser *Diglossa brunneiventris vuilleumieri* o *Atlapetes flaviceps*, pues la mayoría de los estudios de este tipo están enfocados en vegetación arbórea. El modelo de conectividad aquí presentado es solo una propuesta de cómo podría ser utilizado el territorio en el ASRO por esta especie. Es crucial validar el modelo con datos de movimientos de individuos que permitan saber si la capacidad de dispersión implementada es un sub- o sobreestimado, y como las diferentes coberturas implican restricciones al movimiento. Proponemos realizar visitas a los diferentes parches de hábitat idóneo para ver si hay individuos allí, además, de estudiar las características bióticas y abióticas y así encontrar cuales se correlacionan mejor. Por otra parte, estudiar el movimiento del *A. blancae* para estimar su capacidad de dispersión, además de estudios genéticos que permitan estimar la endogamia que pueda existir en las poblaciones. El proyecto Atlapetes ya ha iniciado varios esfuerzos en estas direcciones con el anillamiento de individuos en parches de hábitat idóneo para identificar movimientos individuales y sobrevivencia, además de la toma de muestras de sangre que permitirá evaluar la estructura genética poblacional y verificar si hay alguna diferenciación entre las poblaciones del Norte y Sur. Estudiar la posibilidad de una estrategia de sensibilización sobre la necesidad de migrar a técnicas sostenibles y amigables con el ambiente como los sistemas silvopastoriles, que puedan servir para crear corredores biológicos que permitan no solo a *A. blancae* aumentar su conectividad, sino a otras especies de los diferentes clados que se encuentran también en su hábitat (Edwards et al., 2012; Erfonrs, 2021). Tal es el caso de Álvarez et al., (2022), en donde encontraron que el mantenimiento de sistemas sostenibles puede mantener la diversidad de una comunidad de aves en el tiempo. Por último, desarrollar programas de restauración funcional como proponen Chaparro et al., 2021, enfocados a la siembra y mantenimiento de especies vegetales que consume y utiliza el ave, pues esto puede servir para el desplazamiento y mantenimiento de esta en el ASRO.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Referencias

- Administración Municipal. (2000). *Esquema de ordenamiento territorial del municipio de San Pedro. Administración Municipal San Pedro de los Milagros, acuerdo 080 de 2000. San Pedro de los Milagros: Alcaldía Municipal.*
- Almenar, J. B., Bolowich, A., Elliot, T., Geneletti, D., Sonnemann, G., & Rugani, B. (2019). Assessing habitat loss, fragmentation and ecological connectivity in Luxembourg to support spatial planning. *Landscape and Urban Planning*, 189(335351). 10.1016/j.landurbplan.2019.05.004.
- Alvarez, E. A., Almazán-Núñez, R. C., Corcuera, P., González-García, F., Brito-Millán, M., & Alvarado-Castro, V. M. (2022). and use cover changes the bird distribution and functional groups at the local and landscape level in a Mexican shaded-coffee agroforestry system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330, 107882. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107882>
- Avon, C., & Bergès, L. (2016). Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances. *Landscape Ecology*, 31, 1551-1565. 10.1007/s10980-015-0336-8.
- Badii, M. H., Guillen, A., Rodríguez, C. E., Lugo, O., Aguilar, J., & Acuña, M. (2015). Pérdida de Biodiversidad: Causas y Efectos. : *International Journal of Good Conscience*, 10(2), 156-174. [http://www.spentamexico.org/v10-n2/A10.10\(2\)156](http://www.spentamexico.org/v10-n2/A10.10(2)156)[http://www.spentamexico.org/v10-n2/A10.10\(2\)156-174.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n2/A10.10(2)156-174.pdf)
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Bennett, A. F. (1998 - 2003). *Linkages in the landscape : the role of corridors and connectivity in wildlife conservation* (A. F. Bennett, Ed.). IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xiv + 254 pp.
- Bioclimatic variables — WorldClim 1 documentation.* (n.d.). WorldClim. Retrieved September 20, 2022, from <https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

- BirdLife International. (2021). *Atlapetes blancae*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T22735460A181746724*.
<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20213.RLTS.T22735460A181746724.en>
- Bowman, J., Cappuccino, N., & Fahrig, L. (2002). Patch Size and Population Density: The Effect of Immigration Behavior. *Conservation Ecology*, 6(1), 9.
<http://www.consecol.org/vol6/iss1/art9/>
- Bowne, D. R., & Bowers, M. A. (2004). Interpatch movements in spatially structured populations: a literature review. *Landscape Ecol*, 19(1), 1–20.
<https://doi.org/10.1023/B:LAND.0000018357.45262.b9>
- Brooks, C. P. (2003). A Scalar Analysis of Landscape Connectivity. *Oikos*, 102(2), 433-439. <https://www.jstor.org/stable/3548048>
- Chaparro-Herrera, S., Hernández Schmidt, M., & Lopera-Salazar, A. (2021). Notas sobre la dieta y el hábitat del Gorrión-Montés paisa *Atlapetes blancae* (Passerellidae). *Actualidades Biológicas*, 43(115), e6. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi/v43n115a06>
- Chaparro-Herrera, S., 2014. *Atlapetes blancae*. (2014). In J. D. Amaya-Espinel & G. Kattán (Eds.), *Libro rojo de aves de Colombia* (pp. 336 -338). Pontificia Universidad Javeriana.
- Connor, E. F., Courtney, A. C., & Yoder, J. M. (2000). Individuals-area relationships: the relationship between animal population density and area. *Ecology*, 81(3), 734-748. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[0734:IARTRB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[0734:IARTRB]2.0.CO;2)
- Correa, R., Chaparro-Herrera, S., Lopera-Salazar, A., & Parra, J. L. (2019). Rediscovery of the Antioquia Brush Finch *Atlapetes blancae*. Redescubrimiento del GorriónMontés Paisa *Atlapetes blancae*. *Cotinga*, 41, 101 - 108. : <https://www.researchgate.net/publication/332913121>
- Díaz-Vallejo, M., Chaparro-Herrera, S., Lopera-Salazar, A., Castaño-Díaz, M., Correa, R., & Parra, J. L. (2021). Use of acoustic monitoring to estimate the occupancy

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

of the Antioquia Brush-Finch (*Atlapetes blancae*) a Critically Endangered species. En revision.

DIVA-GIS.org (07 June 2020) DIVA-GIS Occurrence Download
<http://www.divagis.org/datadown>

Donald, P. F., & Evans, A. D. (2006). Habitat connectivity and matrix restoration: the wider implications of agri-environment schemes. *Journal of Applied Ecology*, 43, 209–218. doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01146.x

Donegan, T. (2007). new species of brush finch (Emberizidae: Atlapetes) from the northern Central Andes of Colombia. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, 127(4), 255-268. : <https://www.researchgate.net/publication/259147799>

Edwards, D. P., Fisher, B., & Wilcove, D. S. (2012). High conservation value or high confusion value? Sustainable agriculture and biodiversity conservation in the tropics. *Conservation Letters*, 5(1).
<https://doi.org/10.1111/j.1755https://doi.org/10.1111/j.1755-63X.2011.00209.x263X.2011.00209.x>

EPM (Empresas públicas de Medellín). (1989). Evolución del desarrollo hidroeléctrico en el departamento de Antioquia. *Revista Empresas Públicas de Medellín*, 11(3-4), 79- 81.

Ernfors, M. (2021). The future of agriculture: Creating conditions for a more sustainable agriculture sector with the help of data and connectivity. *School of Architecture and the Built Environment (ABE)*.

Facultad Nacional de Agronomía Medellín. (2008). *Primera sección- territorio, áreas protegidas y ecosistemas-presentaciones orales. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.*

Flanagan, J. N. M., Franke, I., & Salinas, L. (2005). Aves Y Endemismo En Los Bosques Relictos De La Vertiente Occidental Andina Del Norte Del Perú Y Sur Del Ecuador. *Revista Peruana De Biología*, 12(2), 239-48. <https://doi.org/10.15381/rpb.v12i2.2397>

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

- Godínez-Gómez, O., & Correa Ayram, C. A. (2020). *Makurhini: Analyzing landscape connectivity*. DOI: 10.5281/zenodo.3771605
- Gurrutxaga, M., & Lozano, P. J. (2006). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. *Polígonos. Revista De Geografía*, 16, 35-54. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i16.410>
- Gurrutxaga, M., Rubio, L., & Saura, S. (2011). Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: a transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). *Landsc Urban Plan*, 101(4), 310–320. 10.1016/j.landurbplan.2011.02.036
- Hedrick, P. W., & García-Dorado, A. (2016). Understanding Inbreeding Depression, Purging, and Genetic Rescue. *Trends in Ecology and Evolution*, 31, 940-952. doi: 10.1016/j.tree.2016.09.005
- Hijmans, R. J., Cameron, J. L., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hilty, J., Worboys, G. L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B., Locke, H., Carr, M., Pulsford, I., Pittock, J., White, J. W., Theobald, D. M., Levine, J., Reuling, M., Watson, J. E. M., Amen, R., & Tabor, G. M. (2021). *Guidelines for Conserving Connectivity Through Ecological Networks and Corridors*. Area Guidelines Series No. 30. Gland, Switzerland: IUCN. *Corresponding authors: Hilty (jodi@y2y.net), Keeley (annika.keeley@yahoo.com), Woodley (woodleysj@gmail.com), Tabor (gary@largelandscapes.org)
- Isik, K. (2011). Rare and endemic species: Why are they prone to extinction? *Turkish Journal of Botany*, 35(4), 411-417. <https://doi.org/10.3906/bot-1012-90>
- Januchowski-Hartley, S. R., McIntyre, P. B., Diebel, M., Doran, P. J., Infante, D. M., Joseph, C., & Allan, J. D. (2013). Restoring aquatic ecosystem connectivity requires expanding inventories of both dams and road crossings. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 211-217. <https://doi.org/10.1890/120168>

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021). Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 4704-4707. doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
- Kattán, G., Burbano-Girón, J., Gómez, M. F., Amaya-Villarreal, Á. M., Velásquez-Tibatá, J., Renjifo M., L. M., & Amaya-Espinel, J. D. (2014). *Libro rojo de aves de Colombia* (J. D. Amaya-Espinel & G. Kattán, Eds.). Pontificia Universidad Javeriana.
- Kool, J. T., Moilanen, A., & Treml, E. A. (2013). Population connectivity: recent advances and new perspectives. *Landscape ecology*, 28(2), 165 - 185. 10.1007/s10980-012- 9819-z
- Kramer-Schadt, S., Kaiser, T. S., Frank, K., & Wiegand, T. (2011). Analyzing the effect of stepping stones on target patch colonization in structured landscapes for Eurasian lynx. *Landscape Ecology*, 26(4), 501-513. 10.1007/s10980-011-9576-4
- Leclerc, C., Villéger, S., Marino, C., & Bellard, C. (2020). Global changes threaten functional and taxonomic diversity of insular species worldwide. *Divers Distrib*, 26, 402– 414. <https://doi.org/10.1111/ddi.13024>
- Love-Stowell, S. M., Pinzone, C. A., & Martin, A. P. (2017). Overcoming barriers to active interventions for genetic diversity. *Biodiversity and Conservation*, 26(8), 1753- 1765. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1330-z>
- McDonnell, M. J., & Pickett, S. T. A. . Connectivity and the theory of landscape ecology. In Connectivity in Landscape Ecology. In *Proceedings of the 2 nd International Seminar of the "International Association for Landscape Ecology" Münster 1987*. 1987.
- Merriam, G., & Fahrig, L. (1985). Habitat Patch Connectivity and Population Survival.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Ecological Society of America, 66(6), 1762-1768. <http://www.jstor.org/stable/2937372>

Merriam, G.R.A.Y. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. In: *Methodology in landscape ecological research and planning: proceedings, 1st seminar, International Association of Landscape Ecology, Roskilde, Denmark, Oct 15-19, 1984/eds. J. Brandt, P. Agger. Roskilde, Denmark: Roskilde University Centre, 1984.* 1984.

Niculae, M. I., Nita, M. R., Vanau, G. O., & Patroescu, M. (2016). Evaluating the functional connectivity of Natura 2000 forest patch for mammals in Romania. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 28-37. 10.1016/j.proenv.2016.03.009

Nietlisbach, P., Keller, L. F., Camenisch, G., Guillaume, F., Arcese, P. M., Reid, J. M., & Postma, E. (2017). Pedigree-based inbreeding coefficient explains more variation in fitness than heterozygosity at 160 microsatellites in a wild bird population. *Dryad Digital Repository*. 10.5061/dryad.p9s04

Nikolakaki, P. (2004). A GIS site-selection process for habitat creation: Estimating connectivity of habitat patches. *andscape and Urban Planning.*, 68(77-94). 10.1016/S0169-2046(03)00167-1.

Opdam, P., & Wascher, D. (2004). Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation*, 117(3), 285-297. 10.1016/j.biocon.2003.12.008

Pacual-Hortal, L., & Saura, S. (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 21, 959–967. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-0013-z>

QGIS Development Team. (2009). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.osgeo.org>

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. <https://www.R-project.org/>.

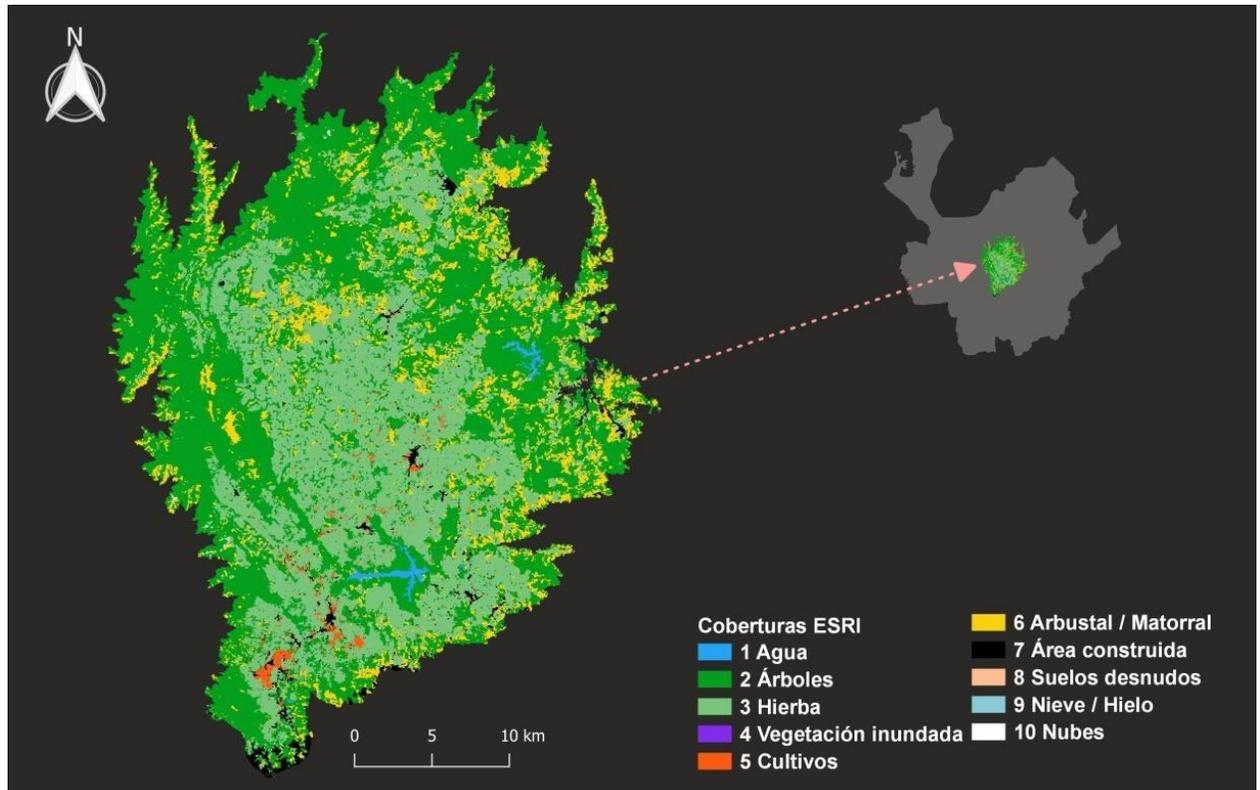
Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

- Renjifo M., M. L., Burbano-Girón, J., Gómez, M. F., Amaya-Villarreal, Á. M., Velásquez-Tibatá, J., Kattán, G. u., & Amaya-Espinel, J. D. (2014). *Libro rojo de aves de Colombia* (J. D. Amaya-Espinel & G. Kattán, Eds.). Pontificia Universidad Javeriana.
- Ruiz-Gómez, C. (2010). *Evaluando conectividad funcional para el Colilarga (*Sylvioorthorhynchus desmursii*, FURNARIIDAE)*.
- Saura, S., Bodin, O., & Fortin, M. J. (2014). Stepping stones are crucial for species' longdistance dispersal and range expansion through habitat networks. *Journal of Applied Ecology*, 51(1), 171–182. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12179>
- Saura, S., & Rubio, L. (2010). A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography*, 33(3), 523-537. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05760.x>
- Taylor, P., Fahrig, L., & With, K. (2006). Landscape connectivity: A return to the basics. In K. Crooks & M. Sanjayan (Eds.). In *Connectivity Conservation* (Conservation Biology, pp. 29-43). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511754821.003
- Taylor, P. D., Fahrig, L., V, K., & Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571–573. <https://doi.org/10.2307/3544927>
- Tischendorf, L., & Fahrig, L. (2000). On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 90, 7-19. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x>
- Tischendorf, L., Grez, A., Zaviezo, T., & Fahrig, L. (2005). Mechanisms Affecting Population Density in Fragmented Habitat. *Ecology and Society*, 10(1). <http://www.jstor.org/stable/26267703>
- Valencia, C., Sánchez-Londoño, J. S., Villamizar, A. I., & Ángel, A. (2019). Una nueva localidad de *Atlapetes blancae* (Passerellidae, Passeriformes), con comentarios sobre su hábitat. *Ornitología Colombiana*, (17), eNB07.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Vogt, P., Ferrari, J. R., Lookingbill, T. R., Gardner, R. H., Riitters, K. H., & Ostapowicz, K. (2009). Mapping functional connectivity. *Ecological Indicators*, 9, 64-71.

Anexos



Anexo 1: Coberturas ESRI 2020 (10 m) para el Altiplano Norte de Antioquia. Los diferentes colores representan cada una de las coberturas de ESRI 2020.

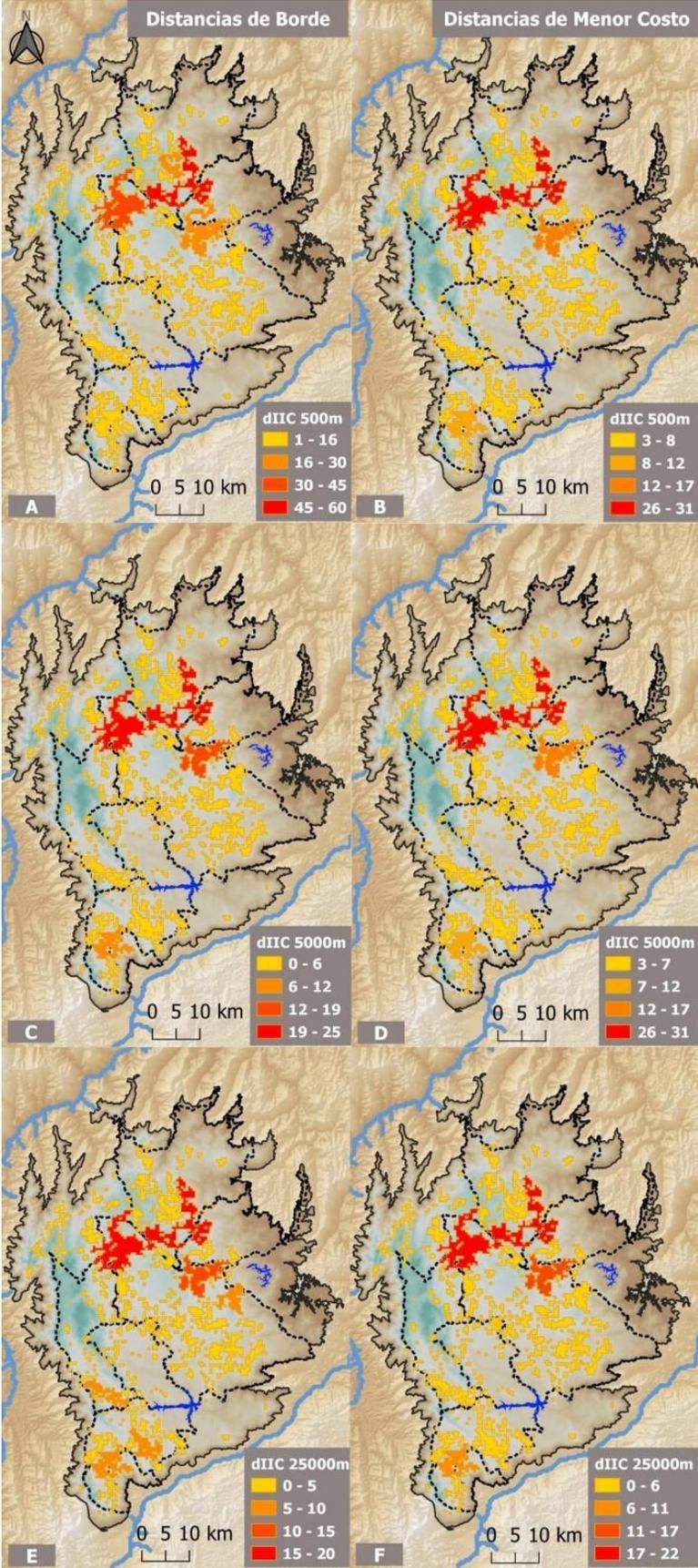
Anexo 2: Coberturas de ESRI 2020 (10m) y sus respectivas definiciones para cada uso de suelo.

Coberturas	Definición
1 Agua	Aguas donde el agua estuvo presente predominantemente durante todo el año; no puede cubrir áreas con agua esporádica o efímera, ejemplos: ríos, estanques, lagos, océanos llanuras inundadas saladas.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

- 2 Árboles** Cualquier agrupación significativa de vegetación densa alta (~ 15m o más), típicamente con un dosel cerrado o denso; ejemplos: vegetación boscosa, grupos de vegetación alta y densa dentro de sabanas, plantaciones, pantanos o manglares.
- 3 Hierba** Áreas abiertas cubiertas de pastos homogéneos con poca o ninguna vegetación más alta; cereales y pastos silvestres sin un trazado humano obvio. Ejemplos: prados y campos naturales con escasa o nula cobertura de árboles.
- 4 Vegetación inundada** Áreas de cualquier tipo de vegetación con evidente entremezclado de agua durante la mayor parte del año; área inundada estacionalmente que es una mezcla de pasto / arbustos / árboles / suelo desnudo; ejemplos: manglares inundados, vegetación emergente, arrozales y otra agricultura muy irrigada e inundada.
- 5 Cultivos** Cereales, pastos y cultivos plantados o en parcelas por seres humanos que no estén a la altura de los árboles; ejemplos: maíz, trigo, soja, parcelas en barbecho de tierra estructurada.
- 6 Arbustal / Matorral** Mezcla de pequeños racimos de plantas o plantas individuales dispersas en un paisaje que muestra suelo o roca expuesta; claros llenos de matorrales dentro de bosques densos que claramente no son más altos que los árboles; ejemplos: cobertura moderada a escasa de arbustos, arbustos y matas de hierba, sabanas con pastos muy escasos, árboles u otras plantas.
- 7 Área construida** Estructuras hechas por humanos; ejemplos: casas, poblados / pueblos / ciudades densas, caminos pavimentados, asfalto.
- 8 Suelos desnudos** Áreas de roca o suelo con escasa o nula vegetación durante todo el año; grandes áreas de arena y desiertos con poca o ninguna vegetación; ejemplos: roca o suelo expuesto, desierto y dunas de arena, salares / sartenes secos, lechos de lagos secos, minas.
- 9 Nieve / Hielo** Nieve o hielo
- 10 Nubes** No hay información sobre la cobertura terrestre debido a la persistente cobertura de nubes.

Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.



Modelo de conectividad para el Gorrión-Montés Paisa, *Atlapetes blancae* (Passerellidae), en el Altiplano Norte de Antioquia: implicaciones para su conservación.

Anexo 3: *Fracciones de dIIC para las diferentes distancias: de borde (A, C y E) y de menor costo (B, D y F) con las diferentes distancias de dispersión probadas. Los diferentes colores representan los valores del dIIC de menor (amarillo) a mayor (rojo).*