



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MORELOS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN**

**VARIACIÓN DE LA COLORACIÓN DEL PLUMAJE DE AVES
RESIDENTES, ASOCIADA A LA DISTANCIA A LAS CONCESIONES
DE MINERÍA METÁLICA EN EL CENTRO-SUR DE MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN BIOLOGÍA INTEGRATIVA DE
LA BIODIVERSIDAD Y LA CONSERVACIÓN**

PRESENTA

BIOL. ALEJANDRO LÓPEZ MICHELENA

DIRECTOR: DRA. MARCELA OSORIO BERISTAIN



CUERNAVACA, MORELOS.

FEBRERO, 2021



Fecha: 15 de febrero de 2021

**Comisión de Seguimiento Académico
Maestría en Biología Integrativa de la
Biodiversidad y la Conservación
Presente**

Como integrante del jurado y después de haber evaluado la tesis titulada “**Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México**” del alumno **Alejandro López Michelena**, con número de matrícula **10022638**, aspirante al grado de Maestro en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, considero que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado. Por lo tanto, emito mi **VOTO APROBATORIO**.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente

Dra. Marcela Osorio Beristain



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MARIA MARCELA OSORIO BERISTAIN | Fecha:2021-02-17 14:36:37 | Firmante

ytsaO7Ba4ucdKchhC78AJN20UfHn3YaHhraoc2T4texl0y9gQjXeLfiqNHeUBHHUjFQcOnEzLOyDqafHmrmposNY8fdK5ZWPL1ezuOCT0CkVYIk1oCfVM8mfTe401o1xJu55prAl+7osBnzC7H3s3ITokta6MaGH7OfZBJAkeOaOanxAchiGTvVXVvaKUjJ3hKya92J23ZAERCmsaGj102D4waNIS5HmhPN9IM2xtM6dGOJqJp/60Q/EC7pZKb2wH+fhFPA6/mdPo1eRABz11ZrWpgGwiv92zhNjKhTIAOWDZJVjSihAx7ARYO7yED6aZZW0h7bQ6oTGkmTUthjMQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



IEnNM

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/dQwbvhVeO0iE99c6SFbqC3de7Oa21aDi>



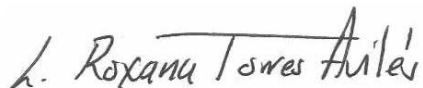
Febrero 8, 2021

**Comisión de Seguimiento Académico
Maestría en Biología Integrativa de la
Biodiversidad y la Conservación
Presente**

Como integrante del jurado y después de haber evaluado la tesis titulada “**Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México**” del alumno **Alejandro López Michelena**, con número de matrícula **10022638**, aspirante al grado de Maestro(a) en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, considero que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado. Por lo tanto, emito mi **VOTO APROBATORIO**.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente



Dra. Roxana Torres Avilés



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

LAURA ROXANA TORRES AVILÉS | Fecha:2021-02-09 12:44:05 | Firmante

**j+/nE0LmYHIBi2t9VaiBzyls2IUOLOviSDnNWsOIs/9bDqOxUeg1/odHbGGxCu+JPKDDvsU3MFxqFUZiVYI0Rh63viM8PaEB92wyefwvxshKln52HrsGwQwZ++z0QbHr0P4jNU2OH
B2v9qUg4zzl9pTFRpwo2FQ9NLf1/Vtw8F0kGUDhtMjuL1zl1jw8D1+xtT7hfvbqrNICjX42HNpPtAuTo6l6QGv3dWfGBMLEkP1Khk4EX5hUe69S/XeXd3Qp+LSt+wuk8pZN8ipPS4f
Ket46Dv7tiSDPNg7WA5pZk0mb9ORJYRxMAA1JcyTrT7qvgrhEy2Fp/5PcxxMfpErdA==**

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



X0ZArB

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/O3jtIWyzdN764mVkB13lHp02bhkFdOZj>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Fecha: 15 de febrero de 2021

**Comisión de Seguimiento Académico
Maestría en Biología Integrativa de la
Biodiversidad y la Conservación
Presente**

Como integrante del jurado y después de haber evaluado la tesis titulada “**Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México**” del alumno **Alejandro López Michelena**, con número de matrícula **10022638**, aspirante al grado de Maestro(a) en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, considero que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado. Por lo tanto, emito mi **VOTO APROBATORIO**.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente

Dr. Valentino Sorani Dalbon



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VALENTINO SORANI DALBON | Fecha:2021-02-15 19:53:44 | Firmante

Y0YAqsC7H1aHimPKj02yJAV7TsvaTfOjIRfveCIIrtuJSj4/gkjoS6bPtPul6gwvBNjtk92KWlmyt0nTv7Sow8QWAngAjzS06LcpAwQirQg2w70vdD0jEKZHPd0ryH6GzYJza0i84pLixN6
UnvW6z5wS+5o+0vjFv59/NliblmzT3Fp1aTIKrrX5fJuqkkdhsbxaurR5fybP/rkNjmfux1gtVDpy0Ds9Jk/ow2GFJzajpr75UjHZje4w1kcTW4yJRDkMxEnAxUrZ0GMnd6nYNU/ezvljgGe
RnFP298RcguXxMQDPhC13QV0Lecb6K7w1sKbbTGcEHHMtbCqc36vUKA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[j2dITs](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/jbwSYGXBxyv18UBFY90QTyplmwodE3Tg>





MUSEO DE ZOOLOGÍA "ALFONSO L. HERRERA"
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA EVOLUTIVA
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



Ciudad de México, 8 de febrero de 2021

Comisión de Seguimiento Académico
Maestría en Biología Integrativa de la
Biodiversidad y la Conservación
Presente

Como integrante del jurado y después de haber evaluado la tesis titulada "**Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México**" del alumno **Alejandro López Michelena**, con número de matrícula **10022638**, aspirante al grado de Maestro(a) en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, considero que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado. Por lo tanto emito mi **VOTO APROBATORIO**.

Atentamente



Dr. Adolfo Gerardo Navarro Sigüenza



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA | Fecha:2021-02-17 12:27:57 | Firmante

oHhMT3dg/ZPKkv3fa7k5FAlpUKIPS2WKSuwTU/cYudPOA0pjXMZyiDEC/ikpuZK5E91VwhBPX/Ctxpnm3IMrc9euluhYg3GdSnVMuYPPfcSbf4ujuft9hlwpmniQLt8k5W5dufuwFjZVw
wki7FhMgMRqYSSMXnHdS6Pr1XbW0flmPzQFk4tg8CdLDgzGNfvl0tNVOC8oqb9zhPLnhzreWVHvqxZl3FGP9/3x79QsE774SQP0qFkzorp+s1K2KfGA0bNhPMSHmlSI6p2gv9y
sJZvtjQiwMkpCQWHSNsHN9aKApKCbBS3vOZ3qQj5gdiSJ+kRn+LohE8qVDySnFKWvzQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[grl32K](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/3J8CPwDlpznHfzv89IZyZPOksFEgRiOr>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Fecha: 6 de febrero de 2021

**Comisión de Seguimiento Académico
Maestría en Biología Integrativa de la
Biodiversidad y la Conservación
Presente**

Como integrante del jurado y después de haber evaluado la tesis titulada “**Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México**” del alumno **Alejandro López Michelena**, con número de matrícula **10022638**, aspirante al grado de Maestro(a) en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, considero que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado. Por lo tanto, emito mi **VOTO APROBATORIO**.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente

Dr. Norman Mercado Silva



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

NORMAN MERCADO SILVA | Fecha:2021-02-08 11:27:05 | Firmante

LFwcy4z2GEREK0eGG7VZsxySs0i4xCL5QVVRaRdetywP1c0Fe1NTYoMm21oh2Jbir1tFhQXBlqDdwixZFWIDKuci1+C3RBIX2FIKu6q1tU6t1xpnER2TUHrmOZhNqIKdUtACJqtu
aCuD+T3NOUOa2RqeztSy1cXY5sLi4w1VWd8RA2BCUoE+C8dWgckTlc/BpO3GsT+HZrkBS48cuJfWYyUCtOSABE/N6z9mSja+6MR8weiuYx117tjMbkgPJdr3mbD/5rc1mvmFY
9/jvPrAwPOyTaZoKAB9qYzzDV6UQYxLXuK4VfPE3hk1ieTGoKkzKQH7zLfwKRfi9q/rhiltg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[2nv6lg](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/fNcyTikw3Hi1vICFNqdIOBxWMEdkUHd6>



Agradecimientos

A la Dra. Marcela Osorio Beristain, por haber sido una excelente asesora desde el principio de este proceso y haber confiado en un estudiante extranjero sin apenas conocerlo.

Al Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) por haberme permitido superarme para alcanzar el grado de Maestro

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para mis estudios.

A la Dra. Lynna Kiere por tanto apoyo: la toma de datos, el procesamiento, todas las preguntas a cualquier hora. La tesis no hubiera sido igual sin ella.

A la Dra. Roxana Torres por sus acertados comentarios durante todo el proceso e interesarse tanto por mi trabajo.

Al Dr. Valenti Sorani por su apoyo durante todo el proceso.

A la coordinación de la Maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación por siempre estar al tanto de nosotros y ser un equipo tan eficiente. Sus rápidas respuestas hicieron todo el proceso más sencillo.

Al Dr. Adolfo Navarro por permitirme el acceso a las colecciones del museo y por sus correcciones al escrito y su interés en mi proyecto.

A la Maestra Fanny Rebón por su asistencia en el museo.

Al Dr. Norman Mercado por una revisión muy exhaustiva y acertada de mi escrito.

Esta tesis forma parte del proyecto “Legado de la contaminación de la minería metálica en la conducta, fisiología y microbiota en poblaciones de aves y humanos del centro-sur de México”, ahora financiado por el CONACyT (proyecto #191975 de Fronteras de la Ciencia)

También, a título personal:

A mis padres, por haber hecho esto posibles, en más de una manera.

A mis amigos, por haber estado ahí todo el tiempo, especialmente Daryl y Daily, cuyo apoyo fue fundamental para emprender esta aventura.

Y finalmente a mi esposa, por haber sido mi compañera, mi brazo derecho durante todos estos tiempos difíciles.

A todos, gracias.

Índice

Introducción	1
Coloración del plumaje de las aves.....	3
<i>Carotenoides</i>	4
<i>Melaninas</i>	7
Efecto de la contaminación sobre la coloración del plumaje de las aves	8
Problema de investigación.....	10
Hipótesis	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos.....	11
Predicciones.....	12
Metodología	13
Aves de estudio	13
Espectrometría	20
Variables colorimétricas utilizadas en el análisis de coloración carotenoide.....	21
Variables colorimétricas utilizadas en el análisis de la coloración melánica	22
Análisis estadístico.....	24
Resultados	28
Análisis de Coloración Carotenoide	28
Análisis de Coloración Melánica.....	34
Análisis de Coloración Eumelánica	34
Análisis de Coloración Feomelánica	35
Discusión	40
Análisis de Coloración Carotenoide	40
Análisis de Coloración Eumelánica	46
Análisis de Coloración Feomelánica	47
Consideraciones generales	48
Conclusiones	50
Recomendaciones	51
Referencias	52
Anexos	62

RESUMEN

Las minas metálicas son una fuente importante de contaminación por liberación y posterior deposición de elementos potencialmente tóxicos, fundamentalmente mercurio, cianuro, metales pesados como el plomo y metaloides como el arsénico. Estos contaminantes pueden bioacumularse y biomagnificarse a través de las redes tróficas, reducir la variabilidad genética de las poblaciones, y afectar la fisiología, conducta, desarrollo, y el éxito reproductivo de organismos expuestos. Las aves pueden ser utilizadas como indicadores de contaminación. Uno de los factores que se ha estudiado en las últimas décadas es el efecto de la contaminación en la expresión de caracteres ornamentales, particularmente en la coloración. En las aves, la coloración de las plumas está dada por la estructura molecular de las plumas y por la deposición en estas de pigmentos, principalmente carotenoides y melaninas. Los carotenoides, responsables de colores de amarillos a rojos, son compuestos incorporados por la dieta que además de dar color, funcionan como antioxidantes e inmunoestimulantes. Las melaninas, que generan colores grises, pardos, castaños y negros son sintetizadas por los animales y confieren a las plumas resistencia y protección contra el desgaste y las radiaciones UV. También existen ejemplos que sugieren que pueden participar en la detoxificación de metales a través de la quelación. Ambos tipos de pigmentos están involucrados en procesos de señalización sexual y otras señales sociales. En este estudio se evaluó el efecto de la proximidad a sitios de minería metálica y sus afluentes río-abajo sobre la coloración del plumaje en aves residentes en el centro-sur de México usando especímenes de museo. Debido a que la contaminación por metales puede disminuir la disponibilidad de recursos tróficos ricos en carotenoides, además de incrementar el

estrés oxidante, se espera que la coloración a base de carotenoides disminuya en las zonas cercanas a las concesiones mineras. La teoría sobre la síntesis de melaninas plantea que esta se potencia en presencia de estrés oxidante, por lo que se espera incremento de la coloración eumelánica y disminución de la feomelánica en las cercanías a las concesiones mineras. Además, se predice que los efectos mencionados anteriormente, sobre melaninas y carotenoides, sea mayor en los gremios tróficos superiores, debido a que pueden estar sujetos a mayor bioacumulación. Se analizaron los parches carotenoides y melánicos pertenecientes a 13 especies de aves residentes colectadas en los estados de Morelos, Guerrero y Oaxaca. En las pieles de los especímenes se cuantificó la reflectancia del color con un espectrómetro. Se midió la distancia desde el punto de colecta de cada individuo a la concesión de minería metálica más cercana, así como la distancia hacia ríos que incluían minas en sus cuencas hidrológicas, y por lo tanto podrían recibir la escorrentía de esas minas. Se realizaron modelos lineales mixtos (LMM, por sus siglas en inglés) con variables colorimétricas como variables dependientes y las distancias como variables explicativas, como sucedáneo de la exposición a la contaminación minera, además de potenciales variables importantes como el gremio trófico y el sexo. El efecto aleatorio fue la especie. Los colores carotenoides en los parches dorsales en los machos y ventrales en las hembras presentaron menores cromas carotenoides y tono con la cercanía a las minas. Esto podría deberse a presiones de selección diferenciales hacia cada sexo. La coloración eumelánica (negra/parda oscura) presentó mayor reflectancia con el incremento a la distancia a las minas, lo que indica una mayor concentración de este pigmento en aves provenientes de zonas potencialmente contaminadas y coincide con la predicción,

aunque sólo se observó en los machos. La coloración feomelánica (castaña/rojiza) presentó mayor reflectancia con el incremento a la distancia a las minas, lo que indica un incremento de este pigmento, acorde a la teoría, aunque en este caso sólo en las hembras. Las diferencias encontradas entre los sexos pueden estar dadas por factores como el incremento de testosterona, cuya síntesis es potenciada por la exposición a los metales, y afectaría más a los machos que producen más de esta hormona. Respecto al gremio trófico, no se encontró efecto en los pigmentos evaluados. La distancia a los ríos afectó a tres de las variables de coloración medidas, con un efecto similar a los de la distancia a las minas en un caso, y efectos contrarios en los demás. Estos resultados mixtos de la distancia a los ríos sobre la coloración podrían deberse a que los recursos que proveen estos hábitats compensen la afectación por la contaminación. Para esclarecer los mecanismos por los cuales se está afectando la coloración, se necesitan evaluaciones de las concentraciones de metales y de hormonas relevantes para la expresión de señales sociales. Los resultados evidencian el problema de contaminación por minería metálica en una región con alta diversidad biológica en Mesoamérica.

ABSTRACT

Metal mines are an important source of contamination due to the release and subsequent deposition of potentially toxic elements, mainly mercury, cyanide, heavy metals such as lead, and metalloids such as arsenic. These pollutants can bioaccumulate and biomagnify through food webs and can reduce the genetic variability of populations, affect the physiology, behavior, development, and reproductive success of exposed organisms. Birds can be used as indicators of contamination. One of the factors that have been studied in recent decades is the effect of contamination on the expression of ornamental characters, particularly on coloration. In birds, the coloration of the feathers is given by the molecular structure of the feathers and by the deposition in these of pigments, mainly carotenoids and melanins. Carotenoids, responsible for colors from yellow to red, are compounds incorporated by the diet that, in addition to adding color, function as antioxidants and immunostimulants. Melanins, which produce black, brown, gray, and brown colors are synthesized by animals and give feathers resistance and protection against wear and UV radiation. There are also examples that suggest that they may participate in metal detoxification through chelation. Both types of pigments are involved in sexual signaling and other social signals. In this study, the effect of proximity to metal mining sites and their downstream tributaries on plumage coloration in resident birds in south-central Mexico was evaluated using museum specimens. Because metal contamination can decrease the availability of carotenoid-rich trophic resources, in addition to increasing oxidative stress, carotenoid-based coloration is expected to decrease in areas close to mining concessions. An increase in eumelanic coloration and a decrease in pheomelanic coloration are expected in the vicinity of mining concessions,

according to the theory that oxidative stress favors the synthesis of the former over the latter. Furthermore, greater effects on both types of colorations are expected in the higher trophic guilds since they may be subject to greater bioaccumulation. The carotenoid and melanic patches belonging to 13 species of resident birds collected in the states of Morelos, Guerrero, and Oaxaca were analyzed. The reflectance of the color was quantified in the study skins with a spectrometer. The distance from the geographic coordinate of each specimen to the closest metallic mining concession was measured, as well as the distance to rivers that included mines in their hydrological basins, and therefore receive runoff from those mines. Linear mixed models (LMM) were performed with colorimetric variables as dependent variables and distances as explanatory variables, as a substitute for exposure to mining contamination, in addition to potentially important variables such as trophic union and gender. The random effect was the species. The carotenoid colors in the dorsal patches in the males and ventral in the females presented lower carotenoid chroma and tone with the proximity to the mines. This could be due to differential selection pressures towards each sex. The eumelanic coloration (black/dark brown) presented higher reflectance with increasing distance to the mines, which indicates a higher concentration of this pigment near the contaminated areas and agrees with the prediction, although it was only observed in males. The pheomelanic coloration (brown/reddish) presented greater reflectance with the increase in the distance to the mines, which indicates an increase in this pigment, according to the theory, although in this case only in females. The differences found between the sexes may be due to factors such as the increase in testosterone, whose synthesis is enhanced by exposure to metals, and would affect more males that produce more of this hormone.

Regarding the trophic guild, no effect was found in the evaluated pigments. The distance to the rivers only affected three of the measured coloration variables, with an effect like those of the distance to the mines in one case, and opposite effects in the others. These mixed results of the distance to the rivers on the coloration could be because the resources provided by these habitats compensate for the effects of pollution. To elucidate the mechanisms by which coloration is being affected, assessments of the concentrations of metals and hormones relevant to the expression of social signals are needed. The results show the problem of contamination by metallic mining in a region with high biological diversity in Mesoamerica.

Introducción

Los efectos nocivos de la minería sobre el ambiente incluyen la deforestación, destrucción de hábitats y contaminación de aguas y suelos. Las minas metálicas son una fuente importante de contaminación por liberación y posterior deposición de elementos potencialmente tóxicos, fundamentalmente mercurio (Hg), cianuro (CN⁻), metales pesados como el plomo (Pb) y metaloides como el arsénico (As) (Lacerda, 1997; Strode et al., 2009). Entre los efectos de la contaminación que mencionan Lifshitz & St Clair (2016) en su revisión se encuentran la afectación del desarrollo, la fisiología, la conducta, el éxito reproductivo y la sobrevivencia; además incrementa las hibridaciones y reduce la diversidad genética, lo que trae como consecuencia la reducción de la viabilidad de las poblaciones e incluso la extinción. La minería ha sido tradicionalmente una de las actividades económicas fundamentales en México, debido a la gran disponibilidad de recursos mineros con que cuenta (Romero & Ruíz, 2010). No obstante, eso ha generado la acumulación de enormes cantidades de jales, o residuos restantes luego que se han extraído los minerales de interés comercial (Medel et al., 2008). Estos jales mineros ocasionan un serio problema ambiental pues pueden generar drenaje ácido a través de la oxidación de sulfuros metálicos, el cual constituye una solución con numerosos elementos potencialmente tóxicos. Estos elementos pueden incorporarse al ecosistema a través de lixiviación y dispersión eólica, contaminando suelos y cuerpos de agua (Corrales-Pérez & Romero, 2013; Medel et al., 2008; Romero & Ruíz, 2010). Los contaminantes se pueden incorporar a la red trófica a través de los productores primarios y pueden bioacumularse en los organismos e incluso incrementar sus concentraciones en eslabones más altos de las redes tróficas mediante un proceso

conocido como biomagnificación (Kidd et al., 2012). Además, los organismos de niveles tróficos más altos también pueden estar expuestos a suelos y aguas contaminados.

La región centro-sur de México presenta una elevada riqueza de recursos mineros; solamente el estado de Guerrero aporta el 2% de la producción de minerales del país (Soto-Ríos et al., 2017). Este estado ha sido muy importante para la producción nacional de minerales metálicos desde el siglo XVI (Servicio Geológico Mexicano, 2018a). El estado de Oaxaca presenta una orografía muy accidentada. En este además convergen dos cadenas montañosas, lo que hace que sea muy rico en recursos mineros, con un antiguo historial minero. Su potencial minero es considerado como uno de los más importantes del país (Servicio Geológico Mexicano, 2018c). Morelos, por su parte, presenta potencial de minerales metálicos en el distrito minero de Huautla, al sur del estado (Servicio Geológico Mexicano, 2018b). La región centro-sur del país es reconocida por presentar una elevada biodiversidad terrestre en Mesoamérica, por lo que constituye una de las Regiones Terrestres Prioritarias para su conservación en México (Arriaga et al., 2000). Por todo lo planteado, el centro-sur de México es una región particularmente susceptible a la exposición a contaminantes derivados de los desechos de la minería metálica y se requieren estudios para evaluar los efectos de estos en diferentes grupos tróficos.

Las aves, fundamentalmente las acuáticas y las rapaces, han sido utilizadas tradicionalmente como bioindicadores de la calidad de los hábitats (Furness et al., 1993; Sánchez-Virosta et al., 2015), ya que, al posicionarse muchas de ellas en eslabones elevados de la cadena alimentaria, son susceptibles a la bioacumulación de contaminantes (Furness et al., 1993). Uno de los efectos de la contaminación en aves

recientemente identificado, es la variación en la expresión de caracteres ornamentales (Hill, 2014).

Coloración del plumaje de las aves

La coloración en las aves se encuentra intrínsecamente relacionada con la sobrevivencia y el éxito reproductivo del individuo, a través de mecanismos como la crípsis y la señalización, por mencionar algunos (Cuthill et al., 2017). Tradicionalmente los colores en la naturaleza se han concebido como productos de la selección natural (Bortolotti, 2006; Cuthill et al., 2017). En particular la coloración de caracteres ornamentales desempeña un rol fundamental en las interacciones sociales, con impacto en variables de éxito reproductivo. Estos caracteres, han sido utilizados como indicadores de la condición física del individuo, lo cual, a su vez, podría indicar indirectamente las condiciones ambientales (Lifshitz & St Clair, 2016).

Los colores del plumaje de las aves son producto del reflejo de la luz en la superficie de las plumas. Esto está determinado por la microestructura de las plumas, la presencia de diferentes tipos de pigmentos, y la combinación de estos dos factores, que hace que la pluma refleje luz en longitudes de onda específicas (Cuthill, 2006). El color percibido por el receptor dependerá de esa luz reflejada, del medio en la que se transmite, y del sistema visual del receptor (Andersson & Prager, 2006). Las aves son tetracromáticas, lo cual significa que sus ojos presentan cuatro tipos de fotorreceptores, por lo que pueden responder a la luz percibida en un rango mayor del espectro electromagnético (315-700nm), en comparación con los humanos (tricromáticos; 400-700nm) (Cuthill, 2006).

Los pigmentos responsables de la coloración en las plumas de las aves son principalmente las melaninas y los carotenoides, aunque hay algunos pigmentos más taxonómicamente restringidos, como las purinas, porfirinas y psitacofulvinas (Galván & Solano, 2016; McGraw, 2006b). Los carotenoides son sintetizados por las plantas e incorporados por los animales a través de la dieta; éstos son responsables de los colores rojos, amarillos y anaranjados (McGraw, 2006). Las melaninas son sintetizadas por el organismo (en el caso de los animales a partir del aminoácido tirosina) y son responsables de los colores grises, pardos, castaños y negros (Dunn et al., 2010).

Carotenoides

Los carotenoides son tetraterpenos (moléculas orgánicas de 40 carbonos), formados por 8 residuos de isopreno cuya secuencia se invierte en el centro de la molécula (Kevin J. McGraw, 2006). Uno o ambos de los extremos del esqueleto hidrocarbonado de enlaces dobles conjugados, puede encontrarse sustituido por algún otro grupo funcional. Los carotenoides que no se encuentran sustituidos (sólo presentan hidrógeno y carbono) se denominan carotenos (como el β -caroteno), mientras que los que presentan átomos de oxígeno en su estructura se denominan xantofilas (como la luteína) (McGraw, 2006). Los colores generados por los carotenoides dependen de varios factores, como su estructura química y su concentración en el tejido correspondiente (Hill et al., 2002). Esta coloración dependerá también del fondo o matriz en el que estén depositados los pigmentos, o sea del componente estructural de la pluma (Jacot et al., 2010). Estos pigmentos se sintetizan por las plantas y los animales los incorporan a través de la dieta, al consumir tanto plantas, como otros animales que los hayan incorporado anteriormente. A pesar de no ser capaces de sintetizar los carotenoides *de novo*, los animales pueden modificarlos

para dar lugar a diferentes formas. Este es el caso de los ketocarotenos, que producen colores rojos como los de los parches de *Agelaius phoeniceus* y *Haemorhous mexicanus* (McGraw et al., 2004). Entre los precursores metabólicos para la formación de carotenoides rojos se encuentran la luteína, la zeaxantina, el β -caroteno y la β -criptoxantina (Lopes et al., 2016).

Los carotenoides han sido muy estudiados desde hace décadas, por sus funciones fisiológicas y de señalización (revisado por Cuthill et al., 2017). Se ha planteado tradicionalmente que los carotenoides desempeñan un papel como antioxidantes e inmunopotenciadores (Geens et al., 2009; Koivula et al., 2011; Monaghan et al., 2009; Peneaux et al., 2020; Weaver et al., 2018). El hecho de que los carotenoides sean moléculas conjugadas implica que pueden aceptar electrones de especies reactivas de oxígeno (McGraw, 2006), lo que puede contribuir a la protección de células y tejidos. Además, pueden ser precursores de otros antioxidantes, como es el caso de la vitamina A, sintetizada a partir del β -caroteno (Weaver et al., 2018). La capacidad de secuestrar radicales libres se ha propuesto que influye en la protección del sistema inmune, al disminuir estas especies reactivas producidas en el metabolismo y durante la respuesta inmune. Bendich (1989) plantea que existe evidencia de más efectos de los carotenoides sobre el sistema inmune, como la potenciación de la respuesta de linfocitos B y T, de la producción de interleucinas (proteínas mensajeras intercelulares involucradas en la respuesta del sistema inmune) y el incremento de la capacidad de los linfocitos T citotóxicos y de los macrófagos. Por ejemplo, se ha encontrado una correlación negativa entre la concentración de carotenoides y carga parasitaria, lo que se asocia a la respuesta inmunitaria (Navara & Hill, 2003). En la actualidad existe debate sobre la

eficiencia de la acción antioxidante de los carotenoides utilizados como señal, en comparación con otros antioxidantes claves como la vitamina E, A o C (Costantini & Møller, 2008; Weaver et al., 2018). No obstante, se plantea que, dado que los carotenoides son sensibles a las especies reactivas del oxígeno (ROS por sus siglas en inglés), la expresión de coloración carotenoide puede señalar la presencia de antioxidantes claves que previenen su oxidación (Costantini & Møller, 2008; Pérez-Rodríguez, 2009).

Por todas las funciones mencionadas y la dependencia de recursos tróficos para la adquisición de los carotenoides, la expresión de estos pigmentos se ha considerado una señal “honesta” de la condición del individuo (Endler, 1980, 1983; Hill et al., 2002; Pacyna et al., 2018; Weaver et al., 2017). Se ha planteado que la coloración carotenoide de las plumas está sujeta a selección sexual en *Parus major*, *Chloebia gouldiae*, *Geothlypis trichas*, *Ploceus cucullatus*, *Haemorhous mexicanus*, *Spinus tristis*, *Emberiza citrinella*, *Linaria cannabina*, *Cardinalis cardinalis*, *Agelaius phoeniceus*, *Euplectes ardens* y *Euplectes axillaris* (Dunn et al., 2010; Hill, 1999). También se ha relacionado con la señalización de calidad del cuidado parental en *Haemorhous mexicanus* (Hill, 1991) y con señales agonísticas. Los machos de *Euplectes ardens* responden menos agresivamente a machos con el parche rojo más intenso, a su vez estos últimos presentan las conductas más agresivas (Pryke et al., 2001). Lo opuesto se observó en los machos de *Agelaius phoeniceus* que presentaron conductas más agresivas hacia intrusos con parches carotenoides aumentados artificialmente (Hansen & Rohwer, 1986). También las hembras de *Icterus pustulatus* respondieron de manera más agresiva a la intrusión de hembras con coloración carotenoide aumentada (Murphy et al., 2009).

Melaninas

Las melaninas son los pigmentos más distribuidos en la naturaleza (Mcgraw, 2006a). Constituyen, junto con los carotenoides, los principales pigmentos responsables de la coloración de las aves, y son incluso más abundantes que estos (Galván & Solano, 2016). Existen dos formas de melaninas: las eumelaninas, responsables de los colores negros, marrones oscuros y grises, y las feomelaninas, responsables de coloraciones ocre (café amarillentas) y castañas (café rojizo) (Galván & Solano, 2016). Ambos tipos de melaninas son sintetizadas por los melanocitos a partir del aminoácido L-tirosina, que es oxidado para formar el precursor de estos pigmentos, la dopaquinona, en una reacción denominada melanogénesis (Galván & Wakamatsu, 2016). Dependiendo de los grupos químicos (grupos aminos, hidroxilos y tioles) con los que reaccione la dopaquinona, se formará eumelanina o feomelanina. En particular, las eumelaninas dependen de la presencia de grupos amino y de elevadas concentraciones de la enzima tirosinasa, mientras que las feomelaninas dependen de la presencia de grupos tioles (Galván & Solano, 2009). Minerales como cobre, zinc, calcio, hierro constituyen intermediarios en la vía de síntesis de las melaninas (Mcgraw, 2006a), por lo que se consideran recursos limitantes para su formación. Las melaninas protegen a los tejidos de agentes degradadores como la radiación UV, los parásitos y la abrasión (Roulin, 2015).

Los parches melánicos son sujetos a selección sexual en aves acuáticas como *Pluvialis apricaria*, *Charadrius morinellus* (Bókony et al., 2003), se observó además una relación positiva entre melanización del plumaje y rituales de cortejo aéreos en 101 especies de chorlitos (Orden Charadriiformes) (Bókony et al., 2003). También funcionan

como señales de estatus durante la defensa del territorio en *Pluvialis apricaria* y en *Passer domesticus* (Møller, 1987).

Se ha hipotetizado que las melaninas constituyen defensas naturales contra elevadas concentraciones de metales pesados, pues son agentes quelantes con gran afinidad por estos (Urán & Cano, 2008). Los grupos aminos, carboxilos e hidroxilos de este pigmento son capaces de unir iones metálicos (Galván & Solano, 2016; Pacyna et al., 2018) lo que explica esta actividad quelante. Varios estudios han encontrado una correlación positiva entre niveles de contaminación por metales y expresión de melaninas en *Parus major* (Dauwe & Eens, 2008), *Columba livia* (Chatelain et al., 2014) y *Tyto alba* (Niecke et al., 2003). El secuestro de metales hacia las plumas puede servir como proceso de detoxificación por medio de la muda (Chatelain et al., 2014).

Efecto de la contaminación sobre la coloración del plumaje de las aves

La coloración de los rasgos ornamentales puede ser un buen indicador de estrés ambiental según el principio del hándicap (Zahavi, 1975) que plantea que sólo individuos con elevada calidad presentarán ornamentos que pueden ser costosos. Esto se aprecia en el caso de las melaninas, cuya síntesis es costosa para el organismo (Dunn et al., 2010; Kevin J. McGraw, 2003), así como en los carotenoides, que solamente se adquieren por la dieta. Las funciones que presentan estos pigmentos, como son las de antioxidantes e inmuno estimulantes, hacen que sólo los individuos que presentan buenas condiciones físicas pueden permitirse la expresión adecuada de las ornamentaciones sin comprometer su sobrevivencia (Lifshitz & St Clair, 2016; Peneaux et al., 2020). Los carotenoides en específico se encuentran relacionados con medidas

del desempeño del individuo como la inmuno competencia, resistencia al estrés oxidante, cantidad de grasa corporal, producción de estructuras proteicas y capacidad aeróbica (Hill, 2014).

La contaminación por metales y metaloides producto de la industria minera, particularmente plomo y arsénico puede afectar la expresión de melaninas y carotenoides en la coloración del plumaje de las aves. Se ha detectado una disminución de la concentración de carotenoides producto o, al menos correlacionada con la contaminación por arsénico (Geens et al., 2009). La revisión realizada por Lifshitz & St Clair (2016) plantea que la exposición a elevadas concentraciones de contaminantes, puede desencadenar una cascada de efectos que incluyen disminución de la respuesta inmune, incremento del estrés oxidante y, por lo tanto, disminución de la supervivencia o el éxito reproductivo. Estas autoras referencian además trabajos en los que se observa que los individuos expuestos a sitios con elevadas concentraciones de plomo (112 ppm), arsénico (9.2 ppm) zinc (260 ppm) y cobre (54.6 ppm) (Dauwe et al., 2004; Dauwe & Eens, 2008) mostraron una disminución de la intensidad de los colores producidos por carotenoides, y una mayor intensidad y área de los colores negros productos de la melanina. Esta disminución de carotenoides puede estar dada por efectos fisiológicos directos de los contaminantes sobre el ave, al ser utilizados estos pigmentos como antioxidantes (Peneaux et al., 2020). La disminución de los carotenos también puede ocurrir por efectos indirectos. Por ejemplo, como resultado del efecto negativo de la contaminación en organismos que se encuentren en eslabones más bajos de la cadena trófica, como insectos o plantas, lo que tendría como consecuencia una menor disponibilidad de alimento rico en carotenos para las aves (Dauwe & Eens, 2008).

En el caso de la melanina, debido a su actividad como agente quelante descrita anteriormente, el secuestro de metales tóxicos para el organismo puede constituir un mecanismo para la eliminación de éstos durante la muda. Esto implica que, en condiciones de estrés por contaminación, la selección natural favorecería a los individuos con mayor concentración de melanina, aunque se requieren más estudios para probar esta hipótesis. También Dauwe & Eens (2008) plantean que la testosterona tiene un efecto positivo en la expresión de caracteres sexuales melánicos, y muchos metales tóxicos estimulan la producción de esta hormona. Además, se ha observado que la contaminación y el estrés oxidante favorecen la eumelanogénesis sobre la feomelanogénesis (Galván & Solano, 2009; Saino et al., 2013). Estos cambios afectan el proceso de la selección sexual (McGraw et al., 2002), lo que puede tener implicaciones negativas en el éxito reproductivo. Aunque si se produce una exageración de los caracteres melánicos, se podría favorecer la elección de estos individuos por el sexo opuesto. Lo cual sería interesante probar.

Problema de investigación

Los elementos potencialmente tóxicos productos de la minería metálica son depositados en los jales, dispersados al ambiente por lixiviación y dispersión eólica e incorporados a la cadena trófica mediante los productores primarios. Esto constituye un problema ambiental en la región del centro-sur de México, la cual presenta una elevada biodiversidad. Particularmente, esta contaminación puede tener un efecto negativo, sea directo o indirecto, en la expresión de la coloración carotenoide del plumaje de aves residentes en áreas cercanas a las minas y a los ríos que reciben escorrentía de ellas. Además, la contaminación puede tener un efecto positivo en la expresión de coloraciones

melánicas, particularmente las eumelánicas, en las aves residentes en estas áreas. Esto implica que estos caracteres podrían funcionar como marcadores de un deterioro de la condición física del organismo y de su capacidad para resistir disturbios. Lo anterior con potenciales consecuencias en las interacciones sociales y ecológicas.

Hipótesis

La contaminación por elementos tóxicos productos de la minería metálica afecta la coloración del plumaje de las aves, disminuyendo la expresión de la coloración carotenoide y feomelánica e incrementando la expresión de la coloración eumelánica, con efectos más pronunciados en los gremios tróficos superiores.

Objetivo general

Evaluar el posible efecto de la contaminación producto de la minería metálica sobre la coloración del plumaje en ejemplares de museo de especies de aves residentes en Guerrero, Morelos y Oaxaca, México

Objetivos específicos

1-Comparar la reflectancia del color en parches carotenoides en pieles de aves de diferentes gremios tróficos y colectadas a diferentes distancias de las concesiones mineras y de los ríos de escurrentía.

2-Comparar la reflectancia de parches de color melánico en pieles de aves de diferentes gremios tróficos colectadas a diferentes distancias de las concesiones mineras y de los ríos de escurrentía.

Predicciones

1-Se espera que la coloración carotenoide sea más opaca en especímenes colectados en las cercanías de las concesiones mineras y de los ríos de escurrentía, relativa a los especímenes colectados en las zonas más alejadas.

2-Se espera un incremento de la coloración eumelánica en especímenes colectados en las cercanías de las concesiones mineras y los ríos de escurrentía, relativa a los especímenes colectados en las zonas más alejadas, así como un efecto inverso en la coloración feomelánica.

3-Se espera que los efectos de la distancia a las concesiones mineras y a los ríos de escurrentía sobre ambos tipos de coloración, sean más pronunciados en los gremios que se encuentren en posiciones más elevadas de la cadena trófica.

Metodología

Aves de estudio

Se trabajó con ejemplares de la colección de aves del Museo de Zoología “Alfonso L Herrera”, de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Se ha demostrado que la coloración de especímenes de museo de una edad de colecta menor a los 50 años no difiere de la coloración de los organismos vivos (Armenta et al., 2008). También se sabe que los datos de reflectancia de especímenes de museo son en general semejantes a los de aves vivas para coloraciones melánicas, carotenoides y estructurales (Doucet & Hill, 2009). Se seleccionó un total de 733 especímenes de 13 especies de aves con categoría de residente en los sitios de estudio (Ramírez-Albores & Ramírez-Cedillo, 2002). Las especies seleccionadas presentaban al menos 15 especímenes adultos con parches de plumaje en buen estado de conservación. La edad se determinó a través del grado de osificación o por plumaje. Se excluyeron los individuos colectados durante la muda y los que no tenían la información acerca de edad o muda. Los ejemplares fueron colectados entre 1979 y 2018. Se seleccionaron especies que pertenecieran a diferentes gremios tróficos según las clasificaciones de González-Salazar et al. (2014) y de Billerman et al. (2020). Para que cada gremio trófico contuviera varias de las especies seleccionadas para los análisis, en este trabajo se conformaron tres gremios generales, atendiendo a los recursos tróficos que mayormente consumen. El primer gremio, incluyó las especies que utilizan fundamentalmente alimentos de origen vegetal (V), un segundo incluyó las especies que utilizan alimentos de origen animal (C) y un tercero con las especies que utilizan alimentos de ambos orígenes (O) (Billerman et al., 2020; González-Salazar et al., 2014) (Tabla 1). Entre las especies seleccionadas se encuentran especies que anidan

en cavidades en el suelo, por lo tanto, en contacto directo con los contaminantes, como *Momotus mexicanus* y *Chloroceryle americana*. Los casos de *Turdus rufopalliatu*s y *Basileuterus belli* fueron también de interés en incluirlos ya que se ha registrado que el primero utiliza lodo para la base de sus nidos y el segundo anida en el suelo, por lo que ambos están en directo contacto con los contaminantes. Para poder evaluar cómo afectan los contaminantes mineros a la expresión de la coloración se seleccionaron especies que presentaban las tres formas fundamentales de coloración en aves: melánica, carotenoide y estructural (Tabla 1). Se realizó una búsqueda en la literatura para identificar el mes de finalización de la muda postjuvenil que se ha reportado para cada especie (Billerman et al., 2020; Guallar et al., 2009). Luego cada mes de colecta se numeró teniendo como uno al mes de finalización de la muda postjuvenil. El uso de este mes de colecta corregido nos permitió evaluar el efecto del mes de colecta sobre la coloración, al tener en cuenta que los primeros meses de colecta corresponderán a plumas más nuevas. Además, se obtuvieron las variables de sexo y fecha de colecta de cada ejemplar. La fecha de colecta es particularmente importante para seleccionar la distancia de cada sitio de colecta a la mina más cercana que se encontraba activa antes o durante el momento de colecta pues sólo esos individuos habrán sido expuestos a los contaminantes.

Se seleccionaron especímenes colectados en localidades de los estados de Morelos, Guerrero y Oaxaca. De la base de datos de colecta se obtuvieron las coordenadas geográficas de cada ejemplar (Figura 1). Se obtuvieron los polígonos de las concesiones de minería metálica (activas o no) de Morelos, Guerrero y Oaxaca del mapa del Servicio Geológico Mexicano ("<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx>").

Para la obtención de las distancias entre cada coordenada de colecta y la concesión minera (en adelante mina) más cercana se utilizó la función *Generate Near Table* del Sistema de Información Geográfica ArcGis 10.1. Con ésta se calculó la distancia en línea recta de cada punto de colecta hacia el punto más cercano del polígono de la mina más cercana. De igual manera se obtuvo la distancia en línea recta del punto de colecta de cada ejemplar al río más cercano que tuviera como mínimo una mina río arriba. Para obtener la localización de estos ríos se utilizó una modificación del procedimiento utilizado por Cuba et al. (2019) mediante la cual se combinó en ArcGis 10.1 un modelo digital de elevación con resolución de 250 m ("<http://srtm.csi.cgiar.org/>") con una capa de precipitaciones anuales ("Bio12"; Kriticos et al., 2012) y de evapotranspiración anual ("annualPET", ENVIREM dataset; Title and Bemmels, 2018), ambas con resolución de 1 km² por píxel. Luego, se determinó el volumen de esorrentía por píxel al restar la evapotranspiración anual de las precipitaciones anuales. Mediante el uso de las herramientas *flow direction* y *flow accumulation* se determinó la dirección y el volumen del flujo acumulado, y se estableció un valor umbral de 100 m³ para considerar un cuerpo de agua como un arroyo/río. Luego, utilizando la herramienta *zone statistics* se calculó el número de minas río arriba que presentaba cada segmento de arroyo/río y se seleccionaron aquellos que presentaban al menos una. Los ríos fueron entonces clasificados respecto al número de concesiones mineras que presentan río arriba. Las categorías fueron baja (1-5 concesiones), media (6-20 concesiones) y alta (21-44).

Tabla 1. Lista de especies seleccionadas para los análisis de coloraciones carotenoide y melánicas. Gremio trófico: Alimentación de origen animal (C), alimentación de origen vegetal (V), alimentación de ambos tipos (O). Tipo de coloración: Melánica (M), Carotenoide (C). Tamaño de muestra por cada especie. Regiones corporales medidas por especie: **1**-Corona, **1am**-Parche amarillo de la corona (*Pitangus sulfuratus*), **1b**-Parche negro del ojo (*Momotus Mexicanus*), **1f**-Parche rojo de la frente (*Melanerpes chrysogenys*), **1j**-Parche amarillo de la ceja (*Basileuterus belli*), **1n**-Parche negro de la corona (*Pitangus sulfuratus*), **1nu**-Parche amarillo de la nuca (*Melanerpes chrysogenys*), **2**-Garganta, **3**-Parche del pecho a la altura de la inserción de las alas, **3n**-Parche negro del pecho (*Momotus Mexicanus*), **4**-Parche del vientre, a la altura de la inserción de las patas, **5**-Parche de la espalda, a la mitad entre la inserción de las alas y de las patas, **5a**-Parche de la espalda alta, a la altura de los hombros, **5r**-Rabadilla, **6**-Parche de la cola, medido la mitad del largo de las rectrices centrales

Orden	Familia	Especie	Gremio Trófico	Tipo de coloración	N	Regiones corporales medidas
Piciformes	Picidae	<i>Melanerpes chrysogenys</i>	C	M/C	38	1f, 1nu, 2, 3, 4
Cuculiformes	Cuculidae	<i>Crotophaga sulcirostris</i>	O	M	59	1, 3, 5, 6
Coraciiformes	Momotidae	<i>Momotus mexicanus</i>	O	M/E	47	1, 1b, 3n
	Alcedinidae	<i>Chloroceryle americana</i>	C	M/E	25	3
Columbiformes	Columbidae	<i>Columbina inca</i>	V	M	29	1, 3, 4, 5a, 5r
Passeriformes	Turdidae	<i>Turdus rufopalliatu</i> s	O	M	64	1, 2, 5, 6

	<i>Turdus assimilis</i>	O	M	76	1, 2, 5, 6
Thraupidae	<i>Volatinia jacarina</i>	V	M/E	20	1, 3, 4, 5a, 5r
Icteridae	<i>Icterus pustulatus</i>	O	C/M	150	1,2,3,4,5,6
Cardinalidae	<i>Passerina leclancherii</i>	O	C/E	54	3, 4
Tyrannidae	<i>Pitangus sulphuratus</i>	O	M/C	15	1am, 1n, 3, 4, 5, 6
Troglodytidae	<i>Thryophilus pleurostictus</i>	C	M	51	1, 5a, 5r
Parulidae	<i>Basileuterus belli</i>	C	M/C	105	1, 1j, 2, 3, 4

Figura 1. Mapa de los estados de Oaxaca, Guerrero y Morelos, que contiene los polígonos de las concesiones mineras metálicas, los ríos que reciben escorrentía de estas, y las localidades de colecta de las 5 especies que presentan coloración carotenoide.

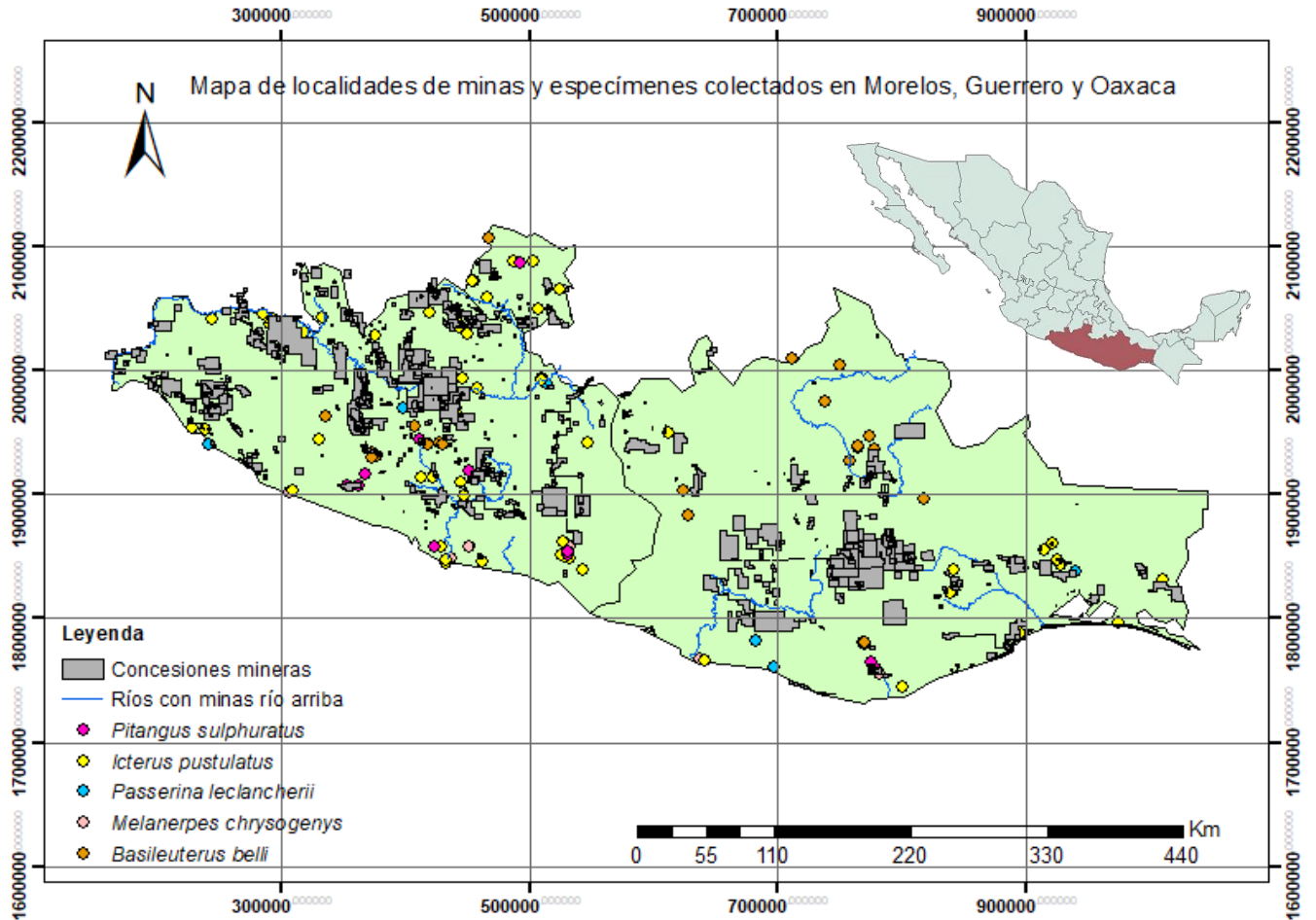


Figura 2. Mapa de los estados de Oaxaca, Guerrero y Morelos, que contiene los polígonos de las concesiones mineras metálicas, los ríos que reciben escorrentía de estas, y las localidades de colecta de las 10 especies que presentan coloración eumelánica.

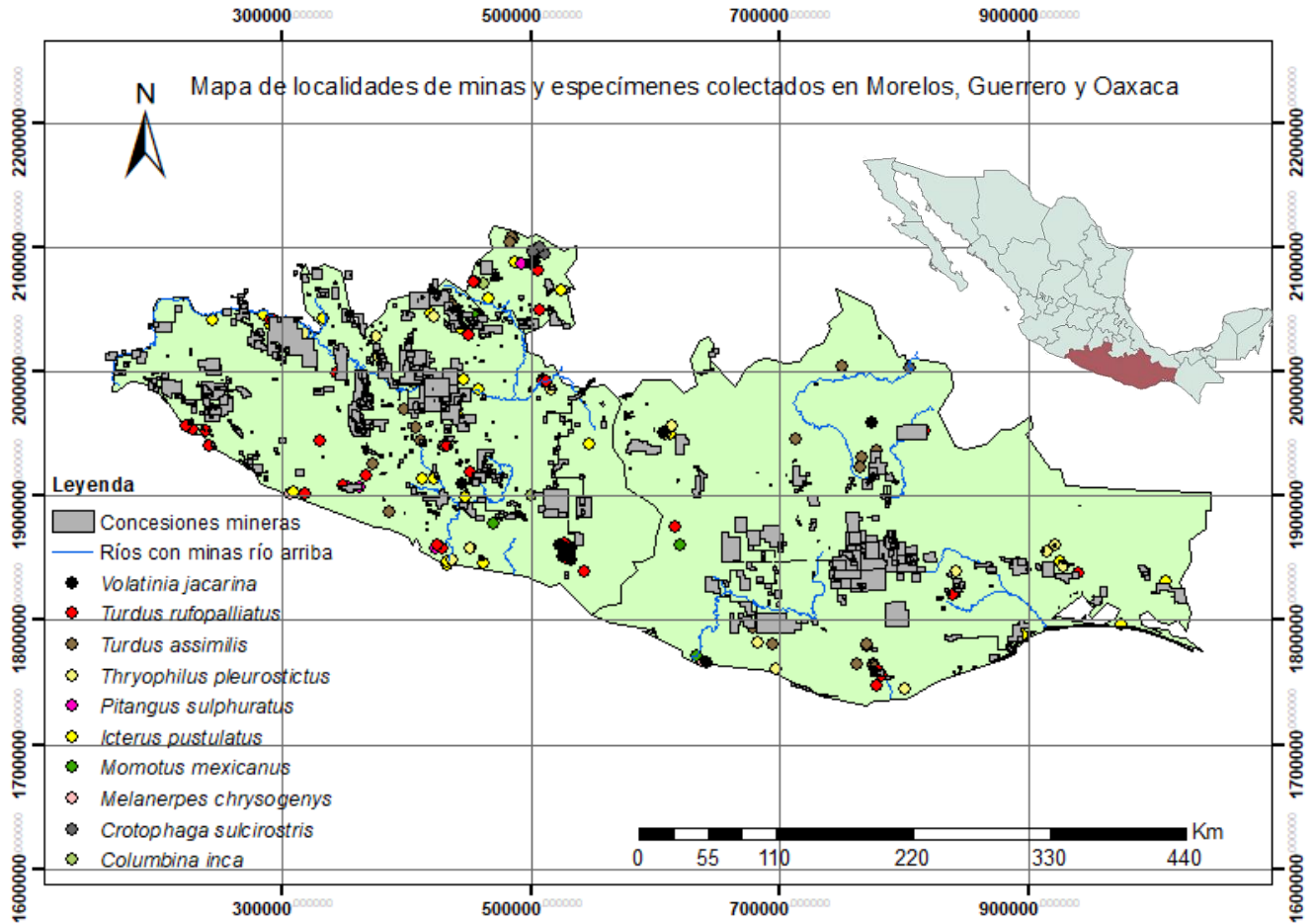
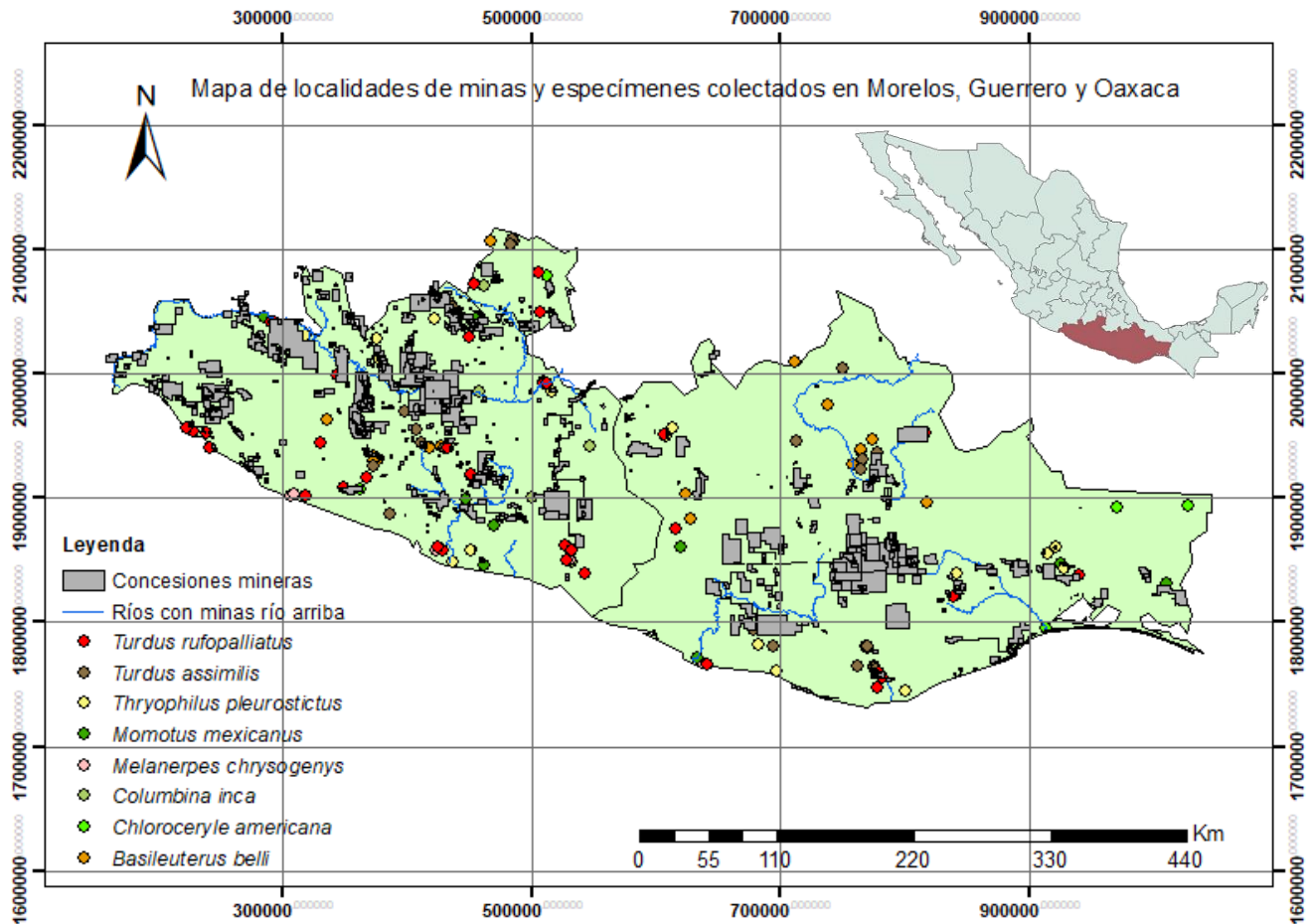


Figura 3. Mapa de los estados de Oaxaca, Guerrero y Morelos, que contiene los polígonos de las concesiones mineras metálicas, los ríos que reciben escorrentía de estas, y las localidades de colecta de las 8 especies que presentan coloración feomelánica.



Espectrometría

Las medidas de color fueron tomadas con un espectrómetro Ocean Optics USB 2000. La sonda de fibra óptica se cubrió con una envoltura negra para excluir la luz ambiente. Se utilizó un estándar blanco de referencia Spectralon y la oscuridad total para la estandarización. La sonda se sostuvo en una posición de 90 grados respecto a la superficie que se midió. La lectura de las medidas de reflectancia y su guardado se realizaron en el software Spectra Suite para Windows. Se tomaron 3 medidas por cada

región corporal. Se seleccionaron regiones corporales que en las aves tienen importancia para la señalización, y se tuvo en cuenta los parches de color de cada especie (Tabla 1).

Para cada región se obtuvo la reflectancia (R), calculada como la proporción de reflectancia en intervalos a través del rango del espectro visible para las aves (320-700 nm). Estas medidas de R crudas fueron utilizadas para calcular variables colorimétricas (descritas en las siguientes secciones) usando el paquete *pavo 2* del software R. En todos los casos se excluyó el área de la curva de reflectancia en la que se refleja la coloración ultravioleta (UV) (320-400nm). Esto se realizó para evitar posibles efectos de confusión provocados por esta coloración UV, que está dada fundamentalmente por características estructurales de la pluma (Lucass et al., 2016). Los datos de reflectancia se agruparon de acuerdo con su ubicación dorsal y ventral y se obtuvieron las variables colorimétricas de cada parche. Luego se promediaron las variables de cada región (dorsal y ventral). Esto permite evaluar la coloración en regiones más amplias y no en parches específicos (Marcondes & Brumfield, 2019).

Variables colorimétricas utilizadas en el análisis de coloración carotenoide

El tono (H3) o posición espectral, que se define como la longitud de onda en el punto medio de reflectancia, es una de las variables que se utiliza para indicar la concentración de carotenoides, pues están correlacionadas positivamente (Andersson & Prager, 2006), aunque también se puede modificar por la mezcla de diferentes carotenoides.

El croma carotenoide absoluto fue la otra variable utilizada como indicadora de la concentración de carotenoides. Esta variable se calculó siguiendo las indicaciones de

Matrková & Remeš (2012), quienes plantean que refleja directamente la concentración de carotenoides en las plumas. Se define como la reflectancia del área de absorción de los carotenoides (400-515nm), dividida entre la reflectancia estructural o de fondo. Esto permite aislar la zona de la curva de reflectancia que es producto de la presencia de pigmentos. La reflectancia estructural o reflectancia de fondo describe el componente estructural de la coloración carotenoide, o sea la zona de la curva de reflectancia que no estará afectada por la presencia de los pigmentos y por tanto la luz será reflejada sólo por la estructura de queratina de la pluma (Matrková & Remeš, 2012). Se define como la reflectancia en la zona de la curva a longitudes de onda superiores a las de absorción de los carotenoides (575-400nm).

Variables colorimétricas utilizadas en el análisis de la coloración melánica

Para realizar los análisis de la coloración melánica, se utilizaron los valores de pendiente de la curva de reflectancia, siguiendo el cálculo de Galván & Wakamatsu (2016). Estos se obtienen como la pendiente de la regresión lineal de los valores de reflectancia como función de la longitud de onda. Estos autores plantean que estos valores son buenos indicadores de la concentración relativa de feomelanina versus eumelanina, de manera que pendientes más positivas indican mayores concentraciones relativas de feomelanina, que corresponde visualmente a colores más rojizos o castaños, versus grises o negros. El valor umbral de pendiente que se utilizó para separar entre los dos tipos de coloración melánica fue de 0.03. Se obtuvieron las pendientes promedio de la curva de reflectancia de cada parche medido, y así fueron clasificados estos parches como eumelánicos o feomelánicos (Tabla 2). Se utilizó además el Brillo promedio (B2): definido como la reflectancia media de 320 a 700 nm, tomada de la tabla 3.2 de

Montgomerie (2006). Las melaninas (y también los carotenoides) son pigmentos sustractores, o sea absorben la luz y por tanto reducen la reflectancia. Esta variable, entonces, se relaciona de manera negativa con la concentración de melaninas, por tanto, puede utilizarse como un indicador pues a mayor concentración, las melaninas absorberán más luz y por tanto se reflejará menos (Andersson & Prager, 2006).

Tabla 2. Clasificación de los parches melánicos seleccionados para cada una de las 12 especies con coloración melánica: Coloración eumelánica (negro). Coloración feomelánica (café, cursiva). Los números representan los valores de pendiente utilizados para la clasificación.

Especie	Corona	Parche ojo	Garganta	Pecho	Parche negro pecho	Vientre	Espalda	Rabadilla	Cola dorsal	Cola ventral
<i>Basileuterus belli</i>	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Chloroceryle americana</i>	-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	-
<i>Columbina inca</i>	0.03	-	-	0.05	-	0.07	0.03	0.03	-	-
<i>Crotophaga sulcirostris</i>	0.004	-	-	0.004	-	-	0.003	-	-0.002	-
<i>Icterus pustulatus</i>	-	-	0.006	-	-	-	-	-	0.008	0.02
<i>Melanerpes chrysogenys</i>	0.06	-	0.04	0.03	-	0.04	-	-	-	-
<i>Momotus mexicanus</i>	0.06	0.001	-	-	0.003	-	-	-	-	-
<i>Pitangus sulfuratus</i>	0.004	-	-	-	-	-	0.03	-	0.03	-

<i>Thryophilus pleurostictus</i>	0.02	-	-	-	-	-	0.03	0.04	-	-
<i>Turdus assimilis</i>	0.02	-	-	0.05	-	-	0.03	-	0.02	-
<i>Turdus rufopalliatus</i>	0.02	-	-	0.08	-	-	0.04	-	0.01	-
<i>Volatinia jacarina</i>	-0.01	-	-	-0.003	-	-	-0.004	-0.004	-	-
							0.0003			

Análisis estadístico

Se realizaron Modelos Lineales Mixtos (LMM) para describir la relación entre las variables colorimétricas y las variables independientes (mencionadas en detalle debajo). Se realizó un modelo para cada variable dependiente de cada región (dorsal y ventral), resultando en un total de 14 modelos. Como variables dependientes se utilizaron las variables colorimétricas mencionadas anteriormente: tono, croma carotenoide absoluto y reflectancia estructural para la coloración carotenoide y brillo promedio y pendiente de la curva de reflectancia para la coloración melánica. Los parches eumelánicos y feomelánicos fueron analizados independientemente, para lo cual se construyeron modelos distintos para las regiones dorsales y ventrales eumelánicas y feomelánicas.

Se tomaron como variables independientes dos variables de distancia: la distancia a la concesión minera más cercana (en los análisis referida como distancia a minas), la distancia al río más cercano que recibe esorrentía de las concesiones mineras (en los análisis referida como distancia a ríos). Además, una variable de categoría de estos ríos que indica tres niveles del número de concesiones mineras río arriba. Las otras variables independientes fueron el sexo, el mes de colecta, el gremio trófico y la longitud y la latitud

de las colectas. La longitud y la latitud de las colectas fueron de interés para tomarlas en cuenta para explorar posibles variaciones geográficas en la coloración. En varias de las especies (*Icterus pustulatus*, *Pitangus sulphuratus*) se han descrito variaciones geográficas en la coloración (Brush & Fitzpatrick, 2020; Cortes-Rodríguez et al., 2008). Lo anterior, se reportó a escalas geográficas mucho mayores que la de los sitios de estudio, no obstante, se incluyeron estas variables de longitud y latitud en caso de que existieran variaciones clinales no descritas. Por ejemplo, se ha reportado en *Icterus pustulatus* una variación latitudinal de la coloración: las poblaciones que se encuentran más al norte de su rango de distribución son más dicromáticas (diferencias en la coloración de los sexos) y con coloración carotenoide más anaranjada (Cortes-Rodríguez et al., 2008). Las poblaciones que habitan más al sur de México son monocromáticas, con coloración más amarilla. Se incluyeron además las interacciones entre distancia a concesiones mineras y sexo, distancia a concesiones mineras y gremio trófico, distancia a ríos y sexo, distancia a ríos y gremio trófico y entre distancia a ríos y categoría de número de concesiones mineras río arriba. Esto permitió discernir si existe un efecto diferencial de ambas distancias sobre la coloración de ambos sexos y si el efecto de ambas distancias es mayor en los gremios tróficos superiores, como es lo esperado. También permite dilucidar si el efecto de la distancia a ríos sobre la coloración será mayor en los ríos que presenten mayor número de minas río arriba. También se incluyó el efecto cuadrático de ambas distancias para permitir que hubiera efectos no lineales (e.g. umbrales). La variable especie se utilizó como efecto aleatorio. Los modelos se realizaron en el software R con la función lmer del paquete lme4. Para cada análisis se realizaron modelos con todas las combinaciones posibles de las variables, y se utilizó el

criterio de información de Akaike (AIC) para seleccionar el modelo que mejor describió la variación en cada caso. Tanto las variables dependientes como las independientes fueron estandarizadas por especie. Las variables explicativas utilizadas para los análisis de coloración se encuentran en la Tabla 3. En el caso de los análisis de los parches carotenoides dorsales no se utilizó gremio trófico pues todas las especies que presentan estos parches pertenecen al mismo gremio (C). Para determinar el posible efecto de las variables explicativas se utilizaron los intervalos de confianza (IC) del 85%.

Tabla 3. Variables utilizadas en los modelos mixtos realizados para explicar las variaciones en las variables colorimétricas de los parches de coloración en las 13 especies estudiadas.

Variable explicativa	Tipo de variable	Valores de las variables categóricas
Distancia a minas (concesiones mineras)	Continua	-
Distancia a ríos	Continua	-
Categoría por número de concesiones mineras río arriba	Categórica	Baja (1-5 concesiones), Media (6-20 concesiones), Alta (21-44 concesiones)
Gremio Trófico	Categórica	Dieta carnívora (C), Dieta intermedia (O), Dieta de origen vegetal (V)
Sexo	Categórica	Hembra, Macho
Latitud de colecta	Continua	-
Longitud de colecta	Continua	-
Mes de colecta	Ordinal	-
(DistMinas) ²	Continua	
(DistRíos) ²	Continua	

DistMinasXSexo	Continua	-
DistMinasXGremio Tráfico	Continua	-
DistRíosXSexo	Continua	-
DistRíosXGremio Tráfico	Continua	-
DistRíosXCatNumMinas	Continua	-

Resultados

Análisis de Coloración Carotenoide

Las dos variables relacionadas al depósito de carotenoides en las plumas, croma carotenoide y tono, se relacionaron con los factores de distancia en los parches de coloración dorsal. Se observó un efecto de la interacción de la distancia a las minas y el sexo en el croma carotenoide absoluto dorsal: intervalos de confianza (en adelante IC) del 85% [0.33, 1.10]. El efecto de dicha interacción no se consideró diferente de cero para las hembras: IC del 85% [-7×10^{-3} , 2×10^{-3}] aunque sí para los machos: IC del 85% [5×10^{-4} , 9×10^{-3}]. La pendiente para los machos fue positiva y para las hembras negativa y la diferencia entre ellas significativa, evidenciado por el efecto significativo de la interacción (Figura 4A). Esto sugiere que el croma carotenoide se incrementa con el aumento de la distancia en los machos y disminuye con el aumento de la distancia en las hembras, aunque en las últimas no es suficiente para ser diferente de cero. En el caso de la distancia a ríos, su interacción con sexo afectó negativamente al croma carotenoide absoluto dorsal: IC del 85% [-1.21, -0.45]. Este efecto fue diferente de cero en las hembras: IC del 85% [7×10^{-4} , 0.1] pero no en los machos: IC del 85% [-7×10^{-3} , 3×10^{-3}]. Las pendientes de estas relaciones sugieren una disminución de la variable dependiente para los machos, así como un aumento para las hembras (Figura 4B). En el caso del modelo que mejor explicó las variaciones en el tono dorsal, se observó una interacción entre sexo y distancia a las minas: IC del 85% [0.21, 0.92]. Específicamente la distancia a las minas no tuvo efecto sobre el tono dorsal de las hembras: IC del 85%

$[-4 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-3}]$, y tuvo un efecto positivo sobre el tono dorsal de los machos: IC del 85% $[2 \times 10^{-3}, 0.01]$ (Figura 5).

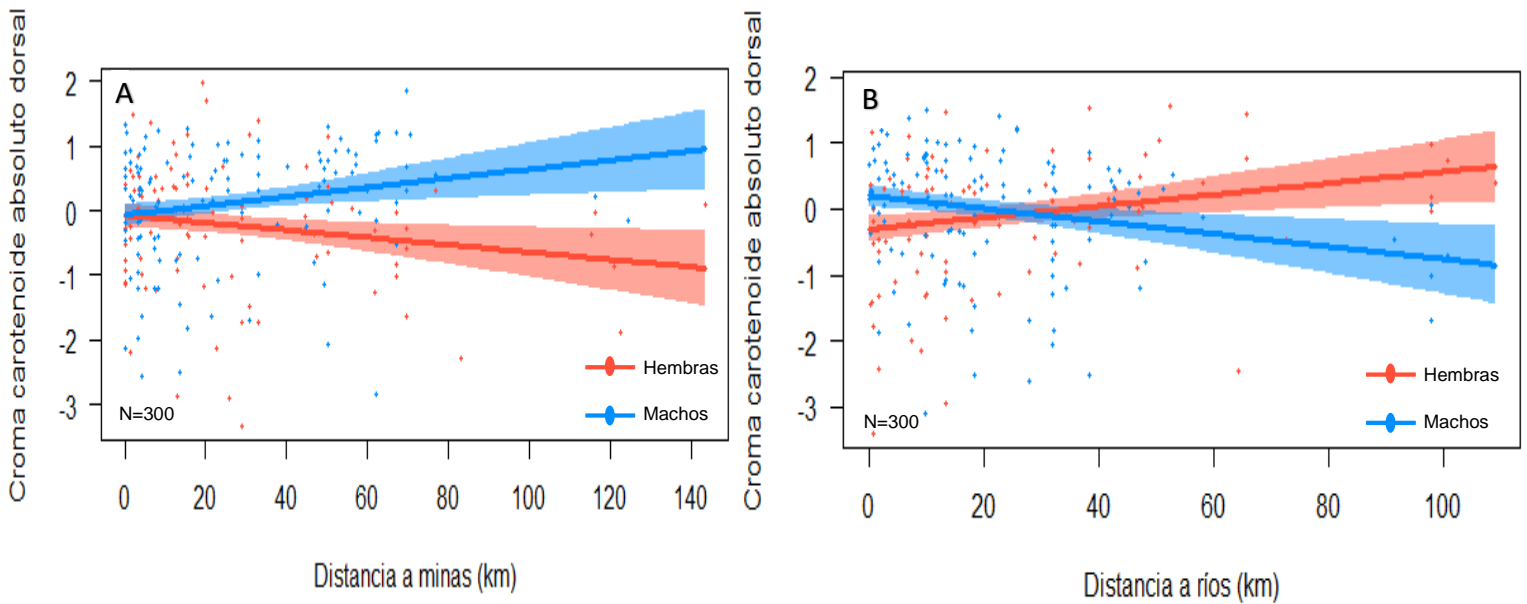


Figura 4. Variación del croma carotenoides absoluto dorsal (escalado) en relación con (A) la interacción entre distancia a minas y sexo, y con (B) la interacción entre distancia a ríos y sexo, en cuatro especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Melanerpes chrysogenys* (MeCh), *Pitangus sulphuratus* (PiSu) e *Icterus pustulatus* (IcPu), colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

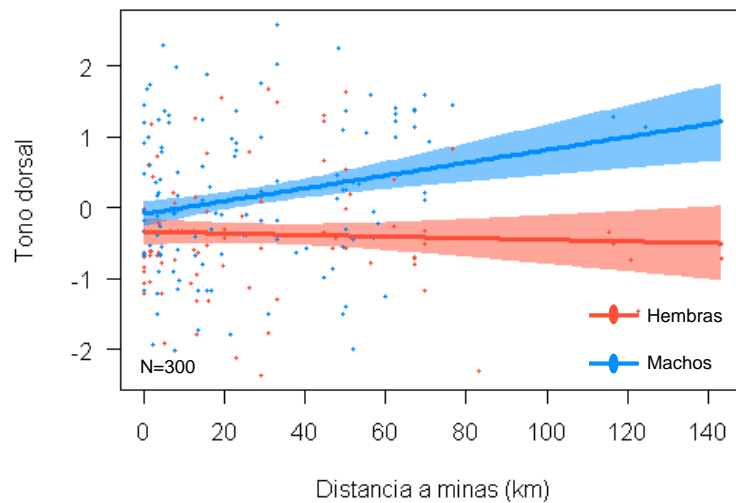


Figura 5. Variación del Tono dorsal (escalado) en relación con la interacción entre distancia a minas y sexo, en cuatro especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Melanerpes*

chrysogenys (MeCh), *Pitangus sulphuratus* (PiSu) e *Icterus pustulatus* (IcPu), colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

En el caso de los parches carotenoides ventrales, el cromatismo carotenoides absoluto y el tono se afectaron con la distancia a las minas y en interacción con el sexo. El efecto de interacción fue importante en el cromatismo carotenoides absoluto ventral: IC del 85% [-0.96, -0.27], con un efecto positivo de distancia a minas solamente en las hembras: IC del 85% [4×10^{-3} , 0.01] (Figura 6A). Una tendencia similar se observó para el tono ventral: IC del 85% [-1.02, -0.34], el cual se incrementó al aumentar la distancia a las minas en las hembras: IC del 85% [8×10^{-3} , 0.02], sin que hubiera efecto alguno en los machos: IC del 85% [-3×10^{-3} , 5×10^{-3}] (Figura 6B).

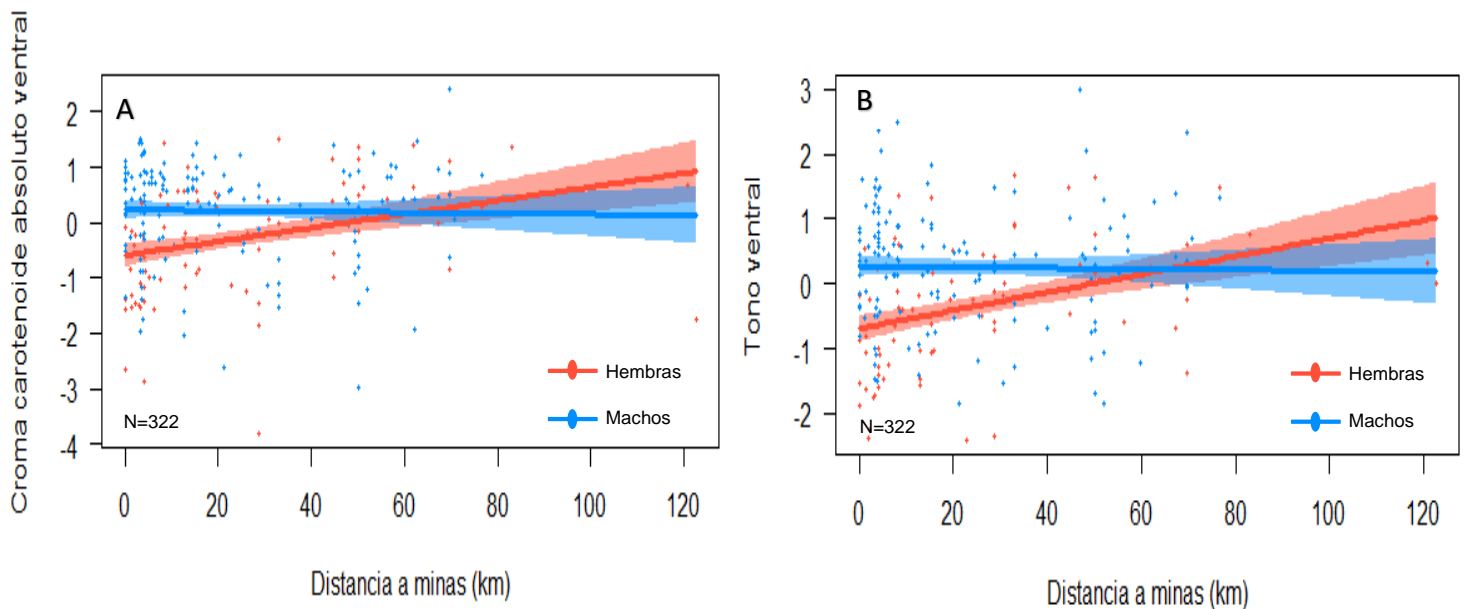


Figura 6. Variación en relación con la interacción de distancia a minas y sexo, del cromatismo carotenoides absoluto ventral (escalado) (A) y el tono ventral (escalado) (B), para 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Pitangus sulphuratus* (PiSu), *Icterus pustulatus* (IcPu) y *Passerina leclancherii* (PaLe), colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

El componente estructural de la coloración (reflectancia estructural), no se relacionó con ninguna de las variables de distancia para los parches dorsales. En el caso de los parches ventrales, la reflectancia se relacionó negativamente con la distancia a ríos: IC del 85% [-0.78, -0.26] (Figura 7A) y positivamente con la distancia a minas: IC del 85% [0.09, 0.47] (Figura 7B).

Se observó además una relación negativa entre latitud de colecta y reflectancia estructural dorsal: IC del 85% [-0.82, -0.46], croma carotenoide absoluto dorsal: CI del 85% [-0.61, -0.25], croma carotenoide absoluto: CI del 85% [-0.66, -0.20] y tono ventral CI del 85% [-0.64, -0.04]. La longitud de colecta se relacionó negativamente con el tono dorsal: CI del 85% [0.15, 0.50] y positivamente con el tono ventral CI del 85% [-0.80, -0.19] y el croma carotenoide absoluto ventral: CI del 85% [-0.74, -0.28]. Ni el gremio trófico, el mes de colecta o las distancias cuadráticas explicaron las diferencias encontradas en ninguna de las variables dependientes (ver Anexos). Las diferencias tampoco se explican por la variable de la categoría por número de concesiones mineras río arriba.

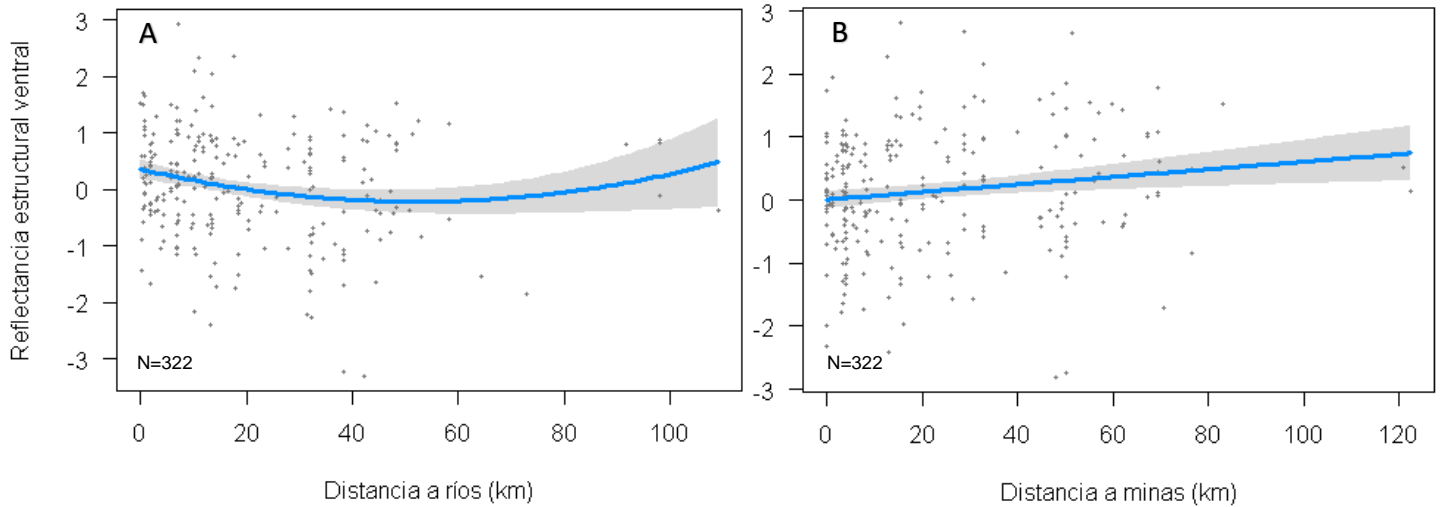


Figura 7. Relación entre la reflectancia estructural ventral (estandarizada) y la distancia a ríos (A), y a minas (B), para 4 especies de aves con parches carotenoides ventrales: *Basileuterus belli* (BaBe), *Pitangus sulphuratus* (PiSu), *Icterus pustulatus* (IcPu) y *Passerina leclancherii* (PaLe), colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

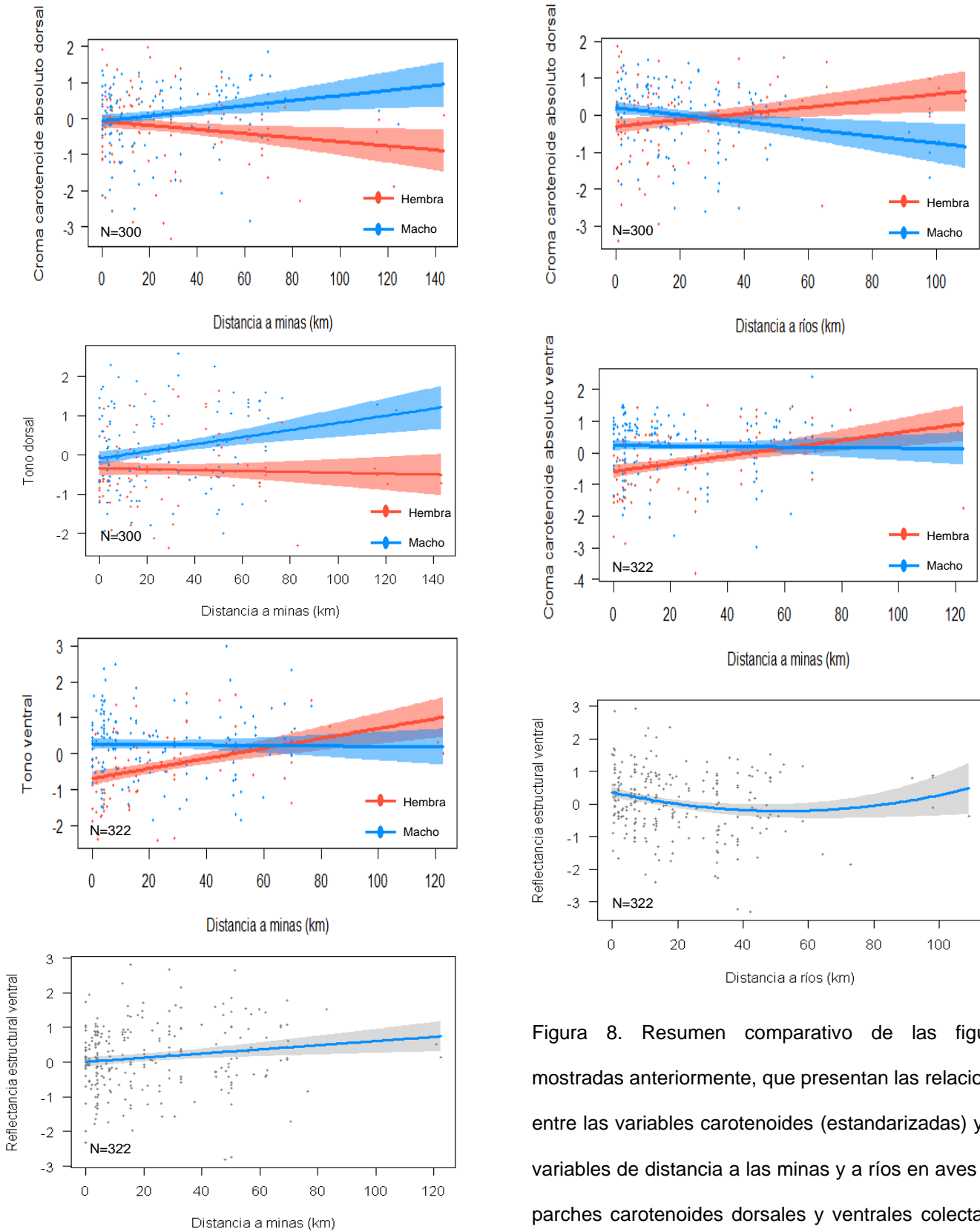


Figura 8. Resumen comparativo de las figuras mostradas anteriormente, que presentan las relaciones entre las variables carotenoides (estandarizadas) y las variables de distancia a las minas y a ríos en aves con parches carotenoides dorsales y ventrales colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca.

Análisis de Coloración Melánica

La coloración melánica se vio afectada por la distancia a las minas y/o a los ríos, el sexo y las interacciones de las distancias con sexo. Los factores gremio trófico, categoría por número de concesiones mineras río arriba, latitud de colecta, longitud de colecta y mes de colecta, no explicaron las variaciones en las variables de coloración melánica.

Análisis de Coloración Eumelánica

Se observó una interacción entre distancia a minas y sexo para el modelo que explicó de mejor manera la variación en el brillo promedio dorsal: CI del 85% [0.07, 0.67]. A pesar de que el efecto de dicha interacción no se consideró diferente de cero para cada sexo individualmente, la interacción con sexo en general sí ocasionó un efecto sobre el brillo promedio. La pendiente del efecto de la distancia a las minas sobre el brillo promedio en los machos aumenta muy ligeramente, mientras que la pendiente para las hembras sugiere que su brillo promedio disminuye al aumentar la distancia a las minas (Figura 9A). Para el brillo promedio de los parches eumelánicos ventrales también se observó un efecto de la interacción distancia a las minas y sexo: CI del 85% [0.46, 1.62]. Aunque la tendencia fue similar al efecto sobre el brillo de parches dorsales, el efecto fue más pronunciado: el brillo de los machos se incrementó a medida que aumentaba la distancia, y a su vez el brillo de las hembras disminuyó (Figura 9B). En este caso la distancia a las minas sí mostró tener un efecto sobre el brillo promedio de los machos:

CI del 85% [3×10^{-3} , 0.01], mas no sobre el de las hembras: CI del 85% [-0.02, 1×10^{-3}].

La pendiente de la curva de reflectancia eumelánica dorsal varió en relación con la interacción entre distancia a ríos y el sexo: CI del 85% [0.12, 0.72]. La pendiente disminuyó a medida que se incrementó la distancia a ríos en las hembras: CI del 85% [-0.01, -1×10^{-3}] y no se observó efecto sobre los machos: CI del 85% [-1×10^{-3} , 7×10^{-3}] (Figura 10).

Análisis de Coloración Feomelánica

La pendiente de la curva de reflectancia de los parches dorsales feomelánicos varió en relación con una interacción distancia de minas y sexo: CI del 85% [-1.16, -0.34]. La curva de reflectancia tuvo una pendiente más positiva, indicando coloración más rojiza, en las hembras conforme aumentaba la distancia a minas: CI del 85% [4×10^{-3} , 0.01], mientras no se observó efecto sobre la pendiente de los machos: CI del 85% [-0.01, 9×10^{-4}], aunque la tendencia fue a una disminución (Figura 11). En el caso de esta variable medida en los parches ventrales, se observó un efecto de la distancia a ríos: CI del 85% [-0.67, -0.22].

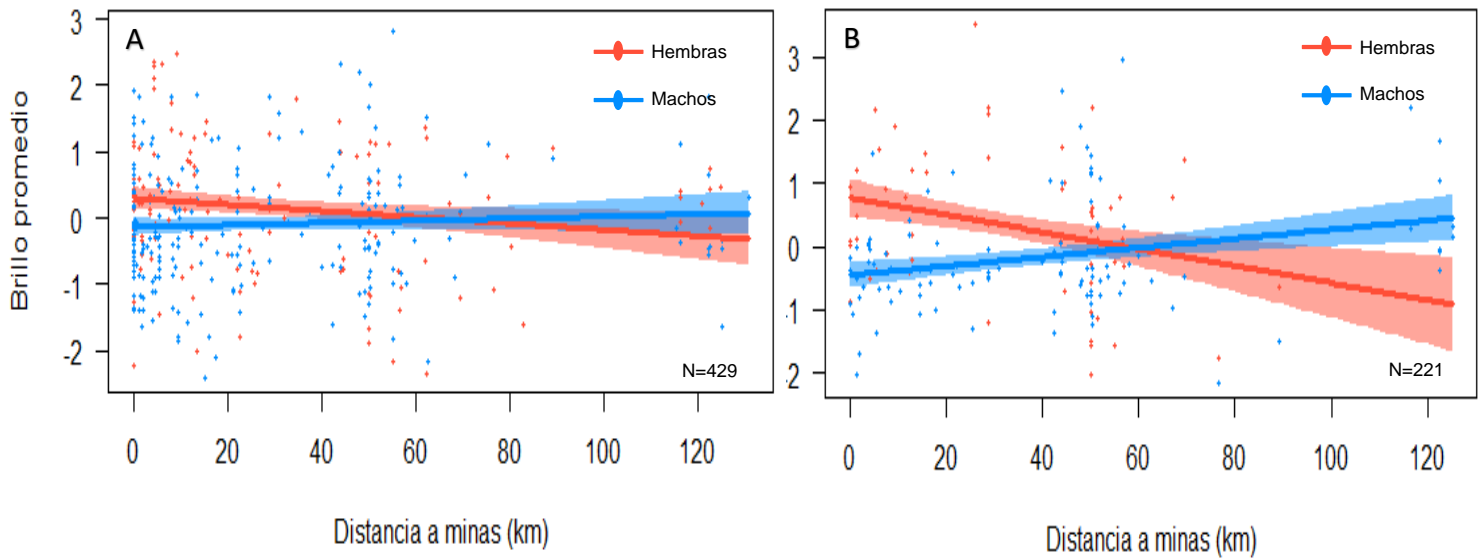


Figura 9. Relación entre el Brillo promedio y la interacción entre distancia a las minas y sexo, para 9 especies de aves con parches eumelánicos dorsales (escalados) (A) y 4 especies con parches eumelánicos ventrales (escalados) (B), colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

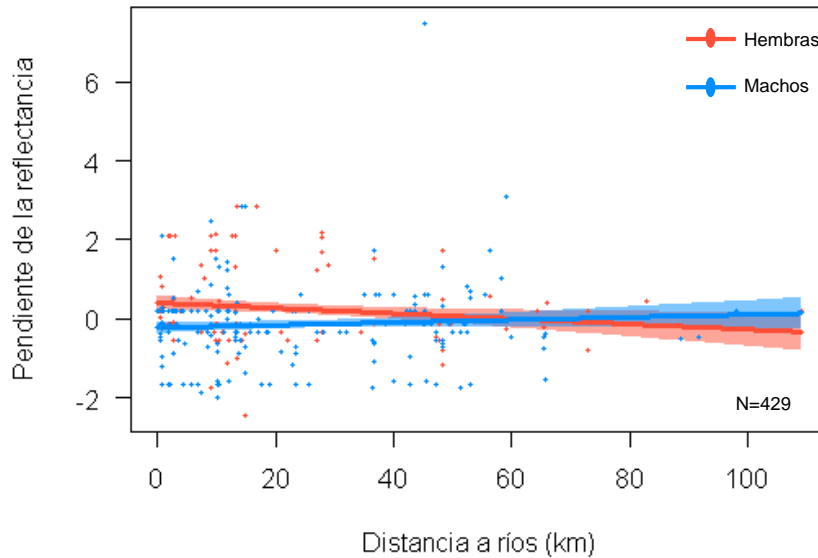


Figura 10. Relación entre la pendiente de la curva de reflectancia en función de la longitud de onda y la interacción entre distancia a las minas y sexo, para 9 especies de aves con parches eumelánicos dorsales, colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

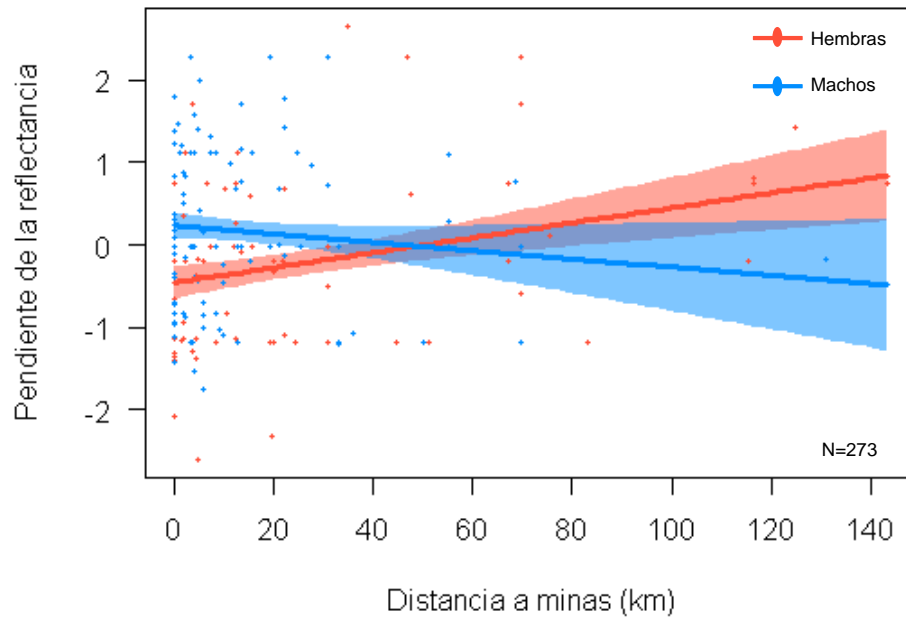


Figura 11. Relación entre la pendiente de la curva de reflectancia (estandarizada) en función de la longitud de onda y la interacción entre distancia a las minas y sexo para 5 especies de aves con parches feomelánicos dorsales, colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

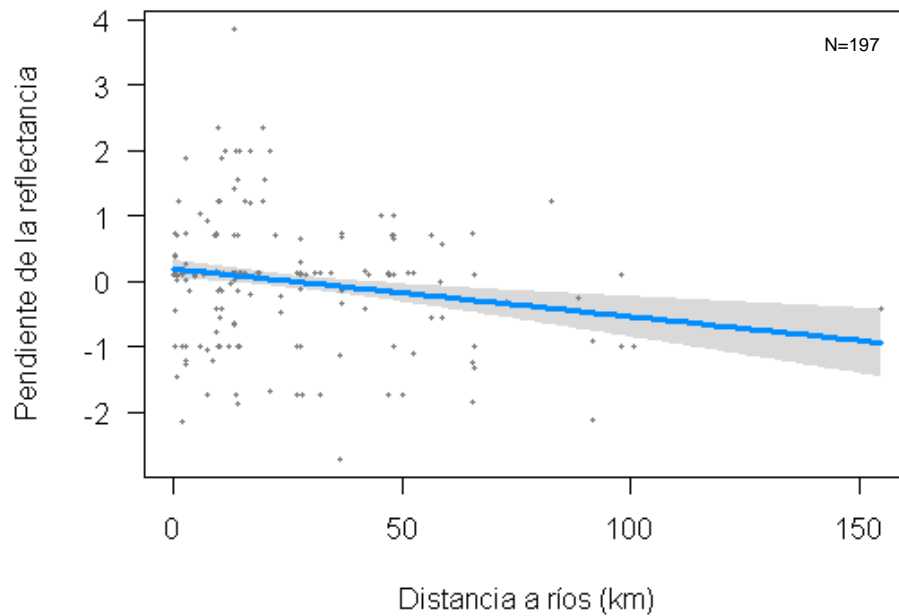


Figura 12. Relación entre la pendiente de la curva de reflectancia en función de la longitud de onda (estandarizada) y la distancia a ríos para 5 especies de aves con parches feomelánicos ventrales, colectadas en Morelos, Guerrero y Oaxaca. Se muestran los intervalos de confianza del 85%.

La pendiente de la curva de reflectancia feomelánica ventral disminuyó con relación al incremento de la distancia a los ríos (Figura 12). Ninguna de las variables de brillo feomelánico se afectaron con las variaciones en las distancias (ver Anexos).

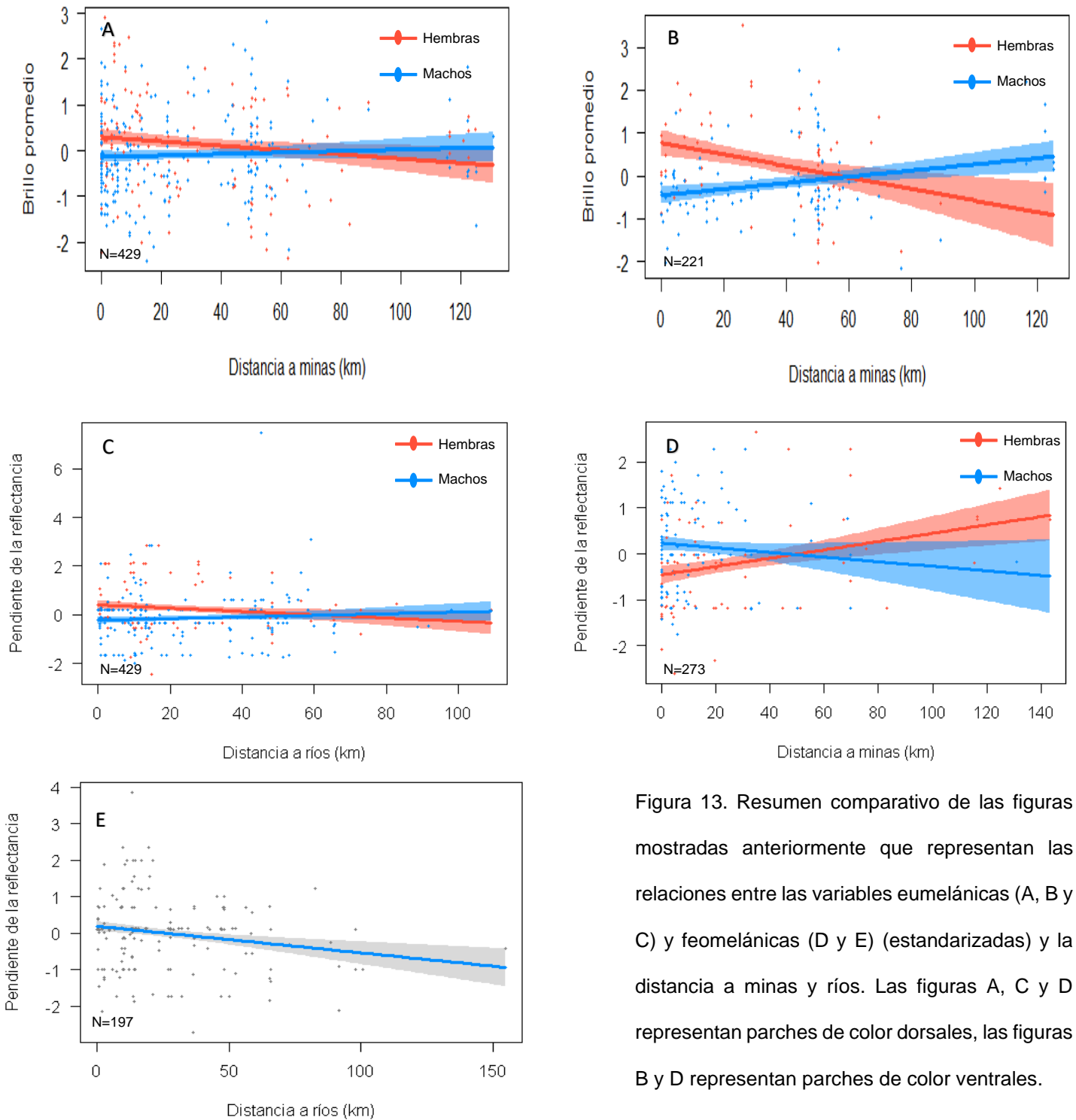


Figura 13. Resumen comparativo de las figuras mostradas anteriormente que representan las relaciones entre las variables eumelánicas (A, B y C) y feomelánicas (D y E) (estandarizadas) y la distancia a minas y ríos. Las figuras A, C y D representan parches de color dorsales, las figuras B y D representan parches de color ventrales.

Discusión

Los resultados obtenidos apoyan las predicciones realizadas sobre el efecto de la distancia a las zonas contaminadas en la coloración carotenoide (en los parches dorsales de los machos y ventrales de las hembras). Así como el efecto de la distancia a las zonas contaminadas sobre las coloraciones eumelánica (de los machos) y feomelánica (de las hembras). En este trabajo se utilizó una metodología barata y no invasiva (no se requirió colecta de animales) para estimar efecto de contaminación sobre variables de coloración en aves. Este tipo de estudios puede servir como estimador preliminar de efectos de contaminación, para luego realizar trabajos donde se midan concentraciones de contaminantes, pigmentos y medidas de condición física de los organismos.

Análisis de Coloración Carotenoide

La saturación carotenoide absoluta y el tono, son variables indicativas de concentración del pigmento carotenoide (Saks et al., 2003). Por lo que en este trabajo se predijo lo siguiente. Una relación positiva y significativa entre las variables indicativas de concentración del pigmento y (a) la distancia a las concesiones mineras y (b) la distancia a los ríos potencialmente afectados por los desechos de las minas. El tono se incrementa monótonicamente con el incremento de la concentración de carotenoides y el croma carotenoide (que representa la pureza espectral) también se incrementa en función de la concentración de estos pigmentos (McGraw, 2006). Por lo que se predijeron colores más claros en el plumaje de las aves conforme la cercanía tanto a los ríos como a las concesiones mineras.

Tanto el croma carotenoide absoluto como el tono de los parches dorsales y ventrales se incrementaron entre más distantes se encontraban los sitios de colecta de las aves de las minas, aunque se observaron diferencias entre hembras y machos. La disminución de la coloración carotenoide en las áreas cercanas a las minas podría deberse a efectos directos de los metales sobre los organismos, o indirectos al afectar la disponibilidad de carotenoides a diferentes niveles de la cadena trófica (Dauwe & Eens, 2008). Esto, a su vez, podría comprometer la adecuación de las aves de manera directa por los efectos tóxicos de los metales pesados y metaloides, e indirectas al modificar la expresión de caracteres con importancia en la señalización de estatus social o sexual. Giraudeau et al. (2015) reportaron una relación negativa de la coloración carotenoide amarilla en *Parus major* con elevadas concentraciones de mercurio, lo que podría estar dado por el uso de los carotenoides como antioxidantes y por el sistema inmune para combatir el estrés oxidativo que ocasiona este metal. Nuestros resultados coinciden además con los de Geens et al. (2009), quienes reportaron diferencias en el croma carotenoide y el tono de *Parus major* entre sitios con diferentes niveles de contaminación por cadmio, plomo, zinc, arsénico y cobre. Utilizaron un gradiente de contaminación que ha sido bien establecido y estudiado en Bélgica. Las diferencias fueron en el mismo sentido que las nuestras, con mayores niveles de saturación y tono en sitios menos contaminados. Sorprendentemente estos autores no detectaron diferencias entre sus sitios de estudio en variables de condición fisiológica de los individuos: concentraciones de albúmina, proteínas, triglicéridos, colesterol o capacidad antioxidante. Este tipo de resultados parece indicar que la perturbación fundamental de la contaminación por metales sobre la coloración, en este caso se debió a una escasez de recursos tróficos

ricos en carotenoides. Lo anterior también se reportó en *Parus major* (Eeva et al., 2008), estos investigadores suplementaron a los individuos con orugas ricas en carotenoides, lo que contrarrestó el efecto de cercanía. Esto es importante porque apoya la validez del uso de la coloración carotenoide como indicadora de calidad de hábitat, incluso si los individuos no están sometidos directamente a estrés oxidativo. Nuestros resultados podrían apoyar la afirmación anterior, y difieren de trabajos existentes que han fallado en encontrar una relación entre la disponibilidad y movilización de carotenoides hacia las plumas y el estrés oxidativo (Isaksson & Andersson, 2007) o la inmunocompetencia (Navara & Hill, 2003), aunque sin haber realizado este tipo de medidas es imposible afirmarlo. Otro estudio con *Parus major* (Eeva et al., 2009) apoya también este posible efecto indirecto. Estos autores reportaron valores menores de croma carotenoide en sitios más contaminados con metales pesados, aunque no encontraron relación entre concentración de estos contaminantes, tanto en la variable de coloración como en las variables de condición. Otro de los resultados de los estudios con *Parus major* consiste en una relación positiva entre las variables de coloración carotenoide amarilla y la disponibilidad de orugas (principal fuente de carotenoides para esta especie) (Eeva et al., 2008, 2009).

En los parches dorsales el croma carotenoide absoluto y el tono se relacionaron positivamente con la distancia a las minas en los machos, esta relación fue negativa para las hembras. En el caso de los parches ventrales el efecto de la distancia a las minas fue positivo para las hembras y no existente para los machos. Estos resultados parecen reflejar diferentes presiones de selección, de exposición a contaminantes y/o disponibilidad fisiológica de carotenoides entre los sexos. Por ejemplo, mayor

dependencia de la disponibilidad de carotenoides en el hábitat, o de la contaminación oxidante en el ambiente, que pueda sesgar la expresión de la coloración de parches dorsales de los machos y ventrales de las hembras. La testosterona podría ser un buen mecanismo que apoye un sesgo hacia la expresión de la coloración de parches dorsales en los machos y ventrales en las hembras. Los diferentes niveles de este andrógeno presentes en los machos y hembras podrían estar relacionados con expresiones diferenciales de caracteres mediados por esta hormona en machos y hembras (Møller et al., 2005). Esto podría apoyar las “hipótesis de desventaja oxidativa y de inmunocompetencia”, sobre todo si se tiene en cuenta que la exposición a metales como el plomo, el cadmio, el magnesio y el zinc producen un incremento de testosterona (Meeker et al., 2010). Esta hipótesis sugiere que la testosterona es promotora de caracteres sexuales secundarios, a costa de suprimir la actividad inmune, incrementar el ritmo metabólico y generar oxidación (Alonso-Alvarez et al., 2007; Weaver et al., 2017). Por lo tanto, este compromiso entre ornamentación y un mantenimiento adecuado del sistema inmune y el equilibrio oxidativo, podría generar efectos de mayor magnitud sobre los caracteres sexuales en los machos que en las hembras. Esta es una afirmación que se debe hacer con cuidado, sobre todo al considerar estudios como el de Blas et al. (2006), en el cual al incrementar experimentalmente los niveles de testosterona en *Alectoris rufa*, trajo como consecuencia un incremento de la concentración de carotenoides en el plasma y en el hígado. Estos autores plantean que sus resultados ponen en duda la hipótesis de desventaja oxidativa y de inmuno compentencia. Lo anterior debido a que la actividad inmunosupresora de la testosterona podría compensarse con el aumento de la disponibilidad de carotenoides en plasma, y el efecto

que estos pueden tener sobre el sistema inmune. Por otro lado, las diferencias de croma carotenoide absoluto obtenidas en los parches dorsales de hembras y machos en el presente estudio, podrían haberse reforzado por la inclusión del parche rojo de la corona de *Melanerpes chrysogenys*, que sólo se presenta en los machos. Un estudio que combine la medición de concentración de metales pesados en aves residentes en zonas con diferentes niveles de contaminación con la medición de parches de coloración ornamental, niveles de testosterona, de carotenoides y de medidas de estrés oxidante, sería ideal para probar las hipótesis mencionadas anteriormente.

La distancia a los ríos sólo afectó al croma carotenoide absoluto dorsal, con una tendencia opuesta al efecto de la distancia a las minas sobre esta variable. En este caso se debe tener en cuenta los beneficios intrínsecos de la cercanía a cuerpos de agua (Bennett et al., 2014). Por ejemplo, los animales se encontrarían atraídos por sitios con mayor disponibilidad de recursos, como lo son las zonas riparias que proveen agua, alimentos, cobertura vegetal y buffer térmico. Aunque, si se tratase de recursos potencialmente dañados por la contaminación, podría suponer una trampa ecológica (Quinlan & Green, 2012). Para este estudio no se tuvo en cuenta la distancia a los ríos que no presentasen concesiones mineras río arriba. Realizar esto podría ayudar a aislar el efecto causado por la deposición de contaminantes de las concesiones mineras.

La falta de efecto de la distancia a las minas sobre el componente estructural de la coloración carotenoide dorsal puede explicarse por el hecho de que los individuos no se encuentren afectados directamente por la contaminación. Según la literatura, este componente puede afectarse por factores ambientales relacionados con la crianza, además de estar determinado parcialmente por la genética (Matrková & Remeš, 2012).

Varios estudios han fallado en encontrar una relación entre este componente estructural y la disponibilidad de carotenoides en la dieta (Jacot et al., 2010; Matrková & Remeš, 2012), por lo que se podría apoyar la hipótesis de una falta de recursos tróficos ricos en carotenoides en las zonas más contaminadas, que provoquen efectos en la pigmentación carotenoide, pero no en su componente estructural. Para comprobar los efectos negativos de la cercanía a concesiones mineras y ríos contaminados, así como posibles efectos compensatorios, sería ideal un estudio longitudinal que midiera sobrevivencia en diferentes puntos de cercanía a estos lugares, así como concentración de contaminantes y disponibilidad de fuentes de alimento. A pesar de lo planteado anteriormente, la distancia a ríos afectó de manera negativa a la reflectancia estructural ventral, mientras que la distancia a las minas la afectó de manera positiva. En el trabajo de Matrková & Remeš (2012), este componente en crías se relacionó inversamente con la coloración carotenoide de la madre genética y directamente con la coloración (tanto los componentes carotenoides como los estructurales) de la madre de crianza. También Osmond et al. (2013) encontraron una relación negativa entre la reflectancia estructural y el éxito reproductivo y cuidado maternal de *Setophaga ruticilla*.

Los resultados obtenidos parecen indicar que los parches ventrales se encuentran más relacionados con la señalización de estatus en las hembras que en los machos, lo cual, junto con los efectos obtenidos sobre los parches dorsales en los machos, apoyan la hipótesis de una acumulación diferencial de pigmentos en ambos sexos producto de diferentes presiones selectivas. Varios estudios han planteado relaciones de parches carotenoides en hembras, con edad, éxito reproductivo, cuidado parental y coloración de la pareja en *Setophaga ruticilla* (Osmond et al., 2013), así como con habilidad en la

defensa del territorio en *Icterus pustulatus* (Murphy et al., 2009). En el caso específico de *Setophaga ruticilla*, otro estudio relacionó negativamente los parches carotenoides de los machos con medidas de cuidado parental (Kappes, 2015) y planteó que estos parches pueden, en su lugar, ser indicadores de calidad genética de los machos.

Análisis de Coloración Eumelánica

El brillo promedio de la coloración eumelánica para parches tanto ventrales como dorsales presentó una tendencia similar, aunque el efecto fue muy superior en los primeros. El aumento del brillo promedio para los machos indica una mayor concentración de eumelaninas en las cercanías a las minas. Esto está de acuerdo con nuestra hipótesis de que, en zonas más contaminadas, la coloración eumelánica podría incrementarse a partir de un incremento de testosterona (Galván & Alonso-Alvarez, 2010; Kevin J. McGraw, 2003). La eumelanina, también podría incrementarse por efectos, independientes o combinados, de la presencia en zonas contaminadas de iones metálicos que pueden utilizarse durante la melanogénesis, y que además modulan la actividad de la tirosinasa (enzima fundamental para la melanogénesis) (Zduniak et al., 2014) y de la capacidad de la melanina para secuestrar iones metálicos (Chatelain et al., 2014, 2015). Una explicación posible para la falta de efecto observada para las hembras podría ser que el efecto de la acumulación de metales sobre la producción de testosterona debería ser menor, dado que en las hembras en general, se producen concentraciones de esta hormona inferiores a las que se producen en los machos (Møller et al., 2005). La potenciación de la síntesis de esta hormona en los machos, pero no en las hembras, puede traer como consecuencia el incremento de la melanogénesis mediada por testosterona.

El mayor efecto de la distancia a las minas sobre variables de coloración, en comparación con el de la distancia a ríos, parece mostrar que la primera constituye un mejor indicador de contaminación, o que la contaminación es inferior en los ríos. Los resultados obtenidos en esta investigación en relación con la coloración carotenoide, son consistentes con esta afirmación, al tener efectos contrarios de ambas distancias en varias de las variables. No obstante, la distancia a las minas no tuvo efecto sobre la pendiente de la curva de reflectancia dorsal, más la distancia a los ríos sí afectó a esta variable en las hembras. La disminución de esta pendiente en las zonas más alejadas de los ríos, indica un incremento de la concentración de eumelaninas en estas áreas, lo que puede sugerir que existen otros factores mezclados en la variable. Se esperaría mayor concentración de eumelanina (como parece indicar los resultados con el brillo promedio) en las zonas más cercanas a los ríos, las que teóricamente deben encontrarse más contaminadas.

Análisis de Coloración Feomelánica

El incremento de la pendiente de la curva de reflectancia en relación con la distancia a las minas en el caso de las hembras está acorde a lo esperado. Según Galván & Wakamatsu (2016), un incremento de esta pendiente puede utilizarse como indicador de un cambio de las concentraciones de eumelanina y feomelanina. Se ha teorizado que un aumento de estas últimas puede ser indicador de condición, pues la vía metabólica para la feomelanina requiere el consumo de antioxidantes como el glutatión, disminuyendo así la concentración de este y por ende su actividad antioxidante (Galván & Solano, 2015). Boratyński et al. (2014) plantean que organismos sometidos a estrés oxidativo presentarán una reducción de la expresión de feomelaninas, por las razones antes

mencionadas. Estos resultados, en conjunto con los obtenidos anteriormente en la coloración eumelánica, apoyan el planteamiento de Galván & Solano (2009) de que los caracteres eumelánicos podrían señalar condiciones de elevado estrés oxidativo, mientras que los caracteres feomelánicos podrían señalar lo opuesto.

El brillo promedio no se afectó por las variables de distancia en ninguno de los caracteres feomelánicos. La pendiente de la reflectancia ventral, sin embargo, disminuyó con el incremento de la distancia a los ríos, lo que sugiere una elevada concentración de feomelanina en las zonas más cercanas a estos. Este resultado puede añadir aún más peso al hecho de que tomar en cuenta sólo la distancia a los ríos podría no ser un buen indicador de contaminación por metales, como también parecen indicar los resultados en la coloración carotenoide y eumelánica. La falta de efecto de la variable de categoría de número de minas río arriba en todos los modelos también apoya esa conclusión. Se requiere tomar en cuenta en el análisis la distancia a todos los ríos, con vs sin minas río arriba.

Consideraciones generales

La falta de efecto de gremio trófico sobre los tres tipos de coloraciones a diferentes distancias a zonas contaminadas podría apoyar la hipótesis de un efecto indirecto de la contaminación por metales producto de la minería, pues no se halló evidencia que pueda indicar bioacumulación. Otra hipótesis podría ser que sí existiera bioacumulación, pero no hubiera diferencias entre gremios, por lo que no podría utilizarse esa variable para estimar esa afectación. No obstante, a pesar de haberse seleccionado especies representantes de varios gremios tróficos, la posterior división en los dos tipos de coloración: carotenoide y melánica (eumelánica y feomelánica), además de la separación

de los análisis en zonas dorsales y ventrales, dificultó la evaluación del efecto del gremio trófico en la coloración, pues en varios casos las especies analizadas pertenecían a sólo un gremio, mientras que en otros solo estaban representados dos gremios tróficos. Se requieren estudios con especies que pertenezcan a diferentes gremios tróficos, y que evalúen efecto de la contaminación en ambos tipos de coloración, que preferentemente incluyan mediciones de niveles de contaminantes metálicos.

Los efectos globales encontrados en este trabajo de la minería metálica en los pigmentos pueden utilizarse como indicadores que reafirmen el conocido problema de la contaminación originada por los contaminantes en una región rica en biodiversidad. Particularmente importante son las variables de respuesta que se midieron ya que están asociadas a señalización social en las aves y, por ende, son variables importantes para el éxito reproductivo de los individuos. Sería deseable medir metales pesados en las plumas. Sin embargo, en ejemplares de museo sujetas a diferente manipulación de las pieles se debe de controlar por esta potencial perturbación en los registros de trazas de los elementos.

Conclusiones

- 1- La coloración carotenoide se afecta negativamente con la disminución de la distancia a las minas, con una diferenciación del efecto en parches dorsales de los machos y parches ventrales de las hembras.
2. El uso de la distancia a ríos con minas río arriba sin tener en cuenta otros factores como distancia a todos los ríos no parece ser una estrategia útil para evaluar el efecto de la contaminación producto de la minería metálica sobre la coloración carotenoide.
- 3- La coloración eumelánica de los machos se incrementa en las zonas más cercanas a las minas, mientras que la coloración feomelánica de las hembras se incrementa en zonas más distantes de las concesiones mineras.
- 4-La variable distancia a ríos no tuvo efectos sobre ambos tipos de coloraciones melánicas, con el mismo sentido que los efectos de la distancia a las minas.
- 5- Los resultados arrojan evidencia sobre el problema de contaminación por minería metálica en una región con alta diversidad biológica en Mesoamérica.

Recomendaciones

- 1- Realizar estudios para evaluar efectos de contaminación en la coloración de aves residentes en México, que incluyan medición de niveles de contaminantes, testosterona y medidas de estrés oxidativo.
- 2- Evaluar cómo la dieta puede modular el efecto de los contaminantes sobre la coloración de aves residentes en México. Para esto se puede realizar un estudio como el recomendado en la discusión, que considere mediciones de concentración de contaminantes, pigmentos, testosterona y variables de condición física, con énfasis en el uso de especies pertenecientes a diferentes gremios tróficos.
- 3- Incluir en posteriores análisis del efecto de la contaminación sobre variables de coloración, la distancia a todos los ríos, no solamente los ríos que reciben escurrentía de las concesiones mineras.

Referencias

- Alonso-Alvarez, C., Bertrand, S., Faivre, B., Chastel, O., & Sorci, G. (2007). Testosterone and oxidative stress: The oxidation handicap hypothesis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1611), 819–825. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3764>
- Andersson, S., & Prager, M. (2006). Quantifying Colors. In G. E. Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration, Volume 1: Mechanisms and Measurements* (pp. 41–89). Harvard University Press.
- Armenta, J. K., Dunn, P. O., & Whittingham, L. A. (2008). Effects of Specimen Age on Plumage Color. *The Auk*, 125(4), 803–808. <https://doi.org/10.1525/auk.2008.07006>
- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad. México. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tcentro.html>
- Bendich, A. (1989). Carotenoids and the Immune Response. *The Journal of Nutrition*, 119(1), 112–115.
- Bennett, A. F., Nimmo, D. G., & Radford, J. Q. (2014). Riparian vegetation has disproportionate benefits for landscape-scale conservation of woodland birds in highly modified environments. *Journal of Applied Ecology*, 51(2), 514–523. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12200>
- Billerman, S. M., Keeney, B. K., Rodewald, P. G., & Schulenberg, T. S. (2020). *Birds of the World*. Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. <https://birdsoftheworld.org/bow/home>
- Blas, J., Pérez-Rodríguez, L., Bortolotti, G. R., Viñuela, J., & Marchant, T. A. (2006). Testosterone increases bioavailability of carotenoids: Insights into the honesty of sexual signaling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(49), 18633–18637. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609189103>
- Bókony, V., Liker, A., Székely, T., & Kis, J. (2003). Melanin-based plumage coloration and flight displays in plovers and allies. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1532), 2491–2497. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2506>
- Boratyński, Z., Lehmann, P., Mappes, T., Mousseau, T. A., & Møller, A. P. (2014). Increased radiation

- from Chernobyl decreases the expression of red colouration in natural populations of bank voles (*Myodes glareolus*). *Scientific Reports*, 4(November). <https://doi.org/10.1038/srep07141>
- Bortolotti, G. R. (2006). Natural Selection and Coloration: Protection, Concealment, Advertisement, or Deception? In G. E. Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration, Volume 2: Function and Evolution* (pp. 3–35). Harvard University Press.
- Brush, T., & Fitzpatrick, J. W. (2020). *Great Kiskadee (Pitangus sulphuratus), version 1.0*. Birds of the World (A. F. Poole and F. B. Gill, Editors). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA.
<https://doi.org/10.2173/bow.grekis.01>
- Chatelain, M., Gasparini, J., & Frantz, A. (2015). Do trace metals select for darker birds in urban areas? An experimental exposure to lead and zinc. *Global Change Biology*, 22(7), 1–32.
- Chatelain, M., Gasparini, J., Jacquin, L., & Frantz, A. (2014). The adaptive function of melanin-based plumage coloration to trace metals. *Biology Letters*, 10(3). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0164>
- Corrales-Pérez, D., & Romero, F. M. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de nicaragua y mexico y alternativas de solución. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 427–446. <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n3a1>
- Cortes-Rodríguez, N., Hernández-Baños, B. E., Navarro-Sigüenza, A. G., & Omland, K. E. (2008). Geographic variation and genetic structure in the streak-backed oriole: Low mitochondrial DNA differentiation reveals recent divergence. *Condor*, 110(4), 729–739.
<https://doi.org/10.1525/cond.2008.8578>
- Costantini, D., & Møller, A. P. (2008). Carotenoids are minor antioxidants for birds. *Functional Ecology*, 22(2), 367–370. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01366.x>
- Cuba, N., Fash, B., Rogan, J., Khan, A., Palma Herrera, J. L., Corrales Andino, R. E., Mondragón Rivera, C. N., Martínez, S., & Sellwood, S. (2019). Measuring and categorizing the water-related downstream risks associated with mineral extraction in Honduras: How severe, and how distributed? *Applied Geography*, 111(February), 102070. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102070>
- Cuthill, I. C. (2006). Perception and Measurements. In G. E. Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration*,

- Volume 1: Mechanisms and Measurements* (pp. 3–40). Harvard University Press.
- Cuthill, I. C., Allen, W. L., Arbuckle, K., & Caspers, B. (2017). The biology of color. *Science*, 357(6350), 1–7. <https://doi.org/10.1126/science.aan0221>
- Dauwe, T., & Eens, M. (2008). Melanin- and carotenoid-dependent signals of great tits (*Parus major*) relate differently to metal pollution. *Naturwissenschaften*, 95(10), 969–973. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0400-1>
- Dauwe, T., Janssens, E., Bervoets, L., Blust, R., & Eens, M. (2004). Relationships between metal concentrations in great tit nestlings and their environment and food. *Environmental Pollution*, 131(3), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.009>
- Doucet, S. M., & Hill, G. E. (2009). Do museum specimens accurately represent wild birds? A case study of carotenoid, melanin, and structural colours in long-tailed manakins *Chiroxiphia linearis*. *Journal of Avian Biology*, 40(2), 146–156. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048X.2009.03763.x>
- Dunn, P. O., Garvin, J. C., Whittingham, L. A., Freeman-Gallant, C. R., & Hasselquist, D. (2010). Carotenoid and melanin-based ornaments signal similar aspects of male quality in two populations of the common yellowthroat. *Functional Ecology*, 24(1), 149–158. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01606.x>
- Eeva, T., Sillanpää, S., & Salminen, J. P. (2009). The effects of diet quality and quantity on plumage colour and growth of great tit *Parus major* nestlings: A food manipulation experiment along a pollution gradient. *Journal of Avian Biology*, 40(5), 491–499. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048X.2008.04535.x>
- Eeva, T., Sillanpää, S., Salminen, J. P., Nikkinen, L., Tuominen, A., Toivonen, E., Pihlaja, K., & Lehikoinen, E. (2008). Environmental pollution affects the plumage color of great tit nestlings through Carotenoid Availability. *EcoHealth*, 5(3), 328–337. <https://doi.org/10.1007/s10393-008-0184-y>
- Endler, J. A. (1980). Natural Selection on Color Patterns in *Poecilia reticulata*. *Society for the Study of Evolution*, 34(1), 76–91.

- Endler, J. A. (1983). Natural and sexual selection on color patterns in poeciliid fishes. *Environmental Biology of Fishes*, 9(2), 173–190. <https://doi.org/10.1007/BF00690861>
- Furness, R. W., Greenwood, J. J. D., & Jarvis, P. J. (1993). Can birds be used to monitor the environment? In R. W. Furness & J. J. D. Greenwood (Eds.), *Birds as Monitors of Environmental Change* (1st ed., Issue 1991, pp. 1–41). Chapman & Hall. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1322-7_1
- Galván, I., & Alonso-Alvarez, C. (2010). Yolk testosterone shapes the expression of a melanin-based signal in great tits: An antioxidant-mediated mechanism? *Journal of Experimental Biology*, 213(18), 3127–3130. <https://doi.org/10.1242/jeb.045096>
- Galván, I., & Solano, F. (2009). The evolution of eu- and pheomelanin traits may respond to an economy of pigments related to environmental oxidative stress. *Pigment Cell and Melanoma Research*, 22(3), 339–342. <https://doi.org/10.1111/j.1755-148X.2009.00559.x>
- Galván, I., & Solano, F. (2015). Melanin chemistry and the ecology of stress. *Physiological and Biochemical Zoology*, 88(3), 352–355. <https://doi.org/10.1086/680362>
- Galván, I., & Solano, F. (2016). Bird integumentary melanins: Biosynthesis, forms, function and evolution. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/ijms17040520>
- Galván, I., & Wakamatsu, K. (2016). Color measurement of the animal integument predicts the content of specific melanin forms. *RSC Advances*, 6(82), 79135–79142. <https://doi.org/10.1039/c6ra17463a>
- Geens, A., Dauwe, T., & Eens, M. (2009). Does anthropogenic metal pollution affect carotenoid colouration, antioxidative capacity and physiological condition of great tits (*Parus major*)? *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 150(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2009.04.007>
- Giraudeau, M., Mateos-Gonzalez, F., Cotín, J., Pagani-Nuñez, E., Torné-Noguera, A., & Senar, J. C. (2015). Metal exposure influences the melanin and carotenoid-based colorations in great tits. *Science of the Total Environment*, 532(100), 512–516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.021>

- González-Salazar, C., Martínez-Meyer, E., & López-Santiago, G. (2014). A hierarchical classification of trophic guilds for North American birds and mammals. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *85*(3), 931–941. <https://doi.org/10.7550/rmb.38023>
- Guallar, S., Santana, E., Contreras, S., Verdugo, H., & Gallés, A. (2009). Paseriformes del Occidente de México: Morfometría, datación y sexado. In *Monografies del Museu de Ciencies Naturals* (Issue 5).
- Hansen, A. J., & Rohwer, S. (1986). Coverable badges and resource defence in birds. *Animal Behaviour*, *34*(PART 1), 69–76. [https://doi.org/10.1016/0003-3472\(86\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0003-3472(86)90007-2)
- Hill, G. E. (1991). Plumage coloration is a sexually selected indicator of male quality. *Nature*, *350*, 337–339.
- Hill, G. E. (2014). Cellular respiration: The nexus of stress, condition, and ornamentation. *Integrative and Comparative Biology*, *54*(4), 645–657. <https://doi.org/10.1093/icb/icu029>
- Hill, G. E. (1999). Mate choice, male quality, and carotenoid-based plumage coloration. In N. J. Adams & R. H. Slowton (Eds.), *Proceedings of the 22nd International Ornithological Congress* (pp. 1–11).
- Hill, G. E., Inouye, C. Y., & Montgomerie, R. (2002). Dietary carotenoids predict plumage coloration in wild house finches. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *269*(1496), 1119–1124. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.1980>
- Isaksson, C., & Andersson, S. (2007). Oxidative stress does not influence carotenoid mobilization and plumage pigmentation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *275*(1632), 1–6. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1474>
- Jacot, A., Romero-Diaz, C., Tschirren, B., Richner, H., & Fitze, P. S. (2010). Dissecting carotenoid from structural components of carotenoid-based coloration: A field experiment with great tits (*Parus major*). *American Naturalist*, *176*(1), 55–62. <https://doi.org/10.1086/653000>
- Kappes, P. J. (2015). *The Influence of Different Pigment-based Ornamental Plumage on Pairing and Reproductive Success of Male American Redstarts (Setophaga ruticilla)*. York University.
- Kidd, K., Clayden, M., & Jardine, T. (2012). Bioaccumulation and Biomagnification of Mercury Through Food Webs. In G. Liu, Y. Cai, & N. O'Driscoll (Eds.), *Environmental Chemistry and Toxicology of*

- Mercury* (1st ed., pp. 455–499). John Wiley & Sons, Inc.
- Koivula, M. J., Kanerva, M., Salminen, J. P., Nikinmaa, M., & Eeva, T. (2011). Metal pollution indirectly increases oxidative stress in great tit (*Parus major*) nestlings. *Environmental Research*, 111(3), 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.01.005>
- Lacerda, L. D. (1997). Global mercury emissions from gold and silver mining. *Water, Air, and Soil Pollution*, 97(3–4), 209–221.
<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed4&NEWS=N&AN=199723977>
7
- Lifshitz, N., & St Clair, C. C. (2016). Coloured ornamental traits could be effective and non-invasive indicators of pollution exposure for wildlife. *Conservation Physiology*, 4(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1093/conphys/cow028>
- Lopes, R. J., Toomey, M. B., & Ferreira, M. S. (2016). Genetic Basis for Red Coloration in Birds Report Genetic Basis for Red Coloration in Birds. *Current Biology*, 26, 1427–1434.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.03.076>
- Lucass, C., Iserbyt, A., Eens, M., & Müller, W. (2016). Structural (UV) and carotenoid-based plumage coloration - signals for parental investment? *Ecology and Evolution*, 6(10), 3269–3279.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2107>
- Marcondes, R. S., & Brumfield, R. T. (2019). Fifty shades of brown: Macroevolution of plumage brightness in the Furnariida, a large clade of drab Neotropical passerines. *Evolution*, 73(4), 704–719. <https://doi.org/10.1111/evo.13707>
- Matrková, J., & Remeš, V. (2012). Environmental and genetic effects on pigment-based vs. structural component of yellow feather colouration. *PLoS ONE*, 7(5), 19–21.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036640>
- Mcgraw, K. J. (2006a). Mechanics of Melanin-Based Coloration. In G. E. Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration, Volume 1: Mechanisms and Measurements* (pp. 243–294). Harvard University Press.
- Mcgraw, K. J. (2006b). Mechanics of Uncommon Colors: Pterins, Porphyrins, and Psittacofulvins. In G. E.

- Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration, Volume 1: Mechanisms and Measurements* (pp. 354–398). Harvard University Press.
- McGraw, K J, Mackillop, E. A., Dale, J., & Hauber, M. E. (2002). Different colors reveal different information: how nutritional stress affects the expression of melanin- and structurally based ornamental plumage RID E-7203-2011. *Journal of Experimental Biology*, 205(23), 3747–3755.
- McGraw, Kevin J. (2003). Melanins, metals, and mate quality. *Oikos*, 102(2), 402–406.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0579.2003.12513.x>
- McGraw, Kevin J. (2006). Mechanics of Carotenoid — Based Coloration. In G. E. Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration, Volume 1: Mechanisms and Measurements* (pp. 177–242). Harvard University Press.
- McGraw, Kevin J., Wakamatsu, K., Clark, A. B., & Yasukawa, K. (2004). Red-winged blackbirds *Agelaius phoeniceus* use carotenoid and melanin pigments to color their epaulets. *Journal of Avian Biology*, 35(6), 543–550. <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2004.03345.x>
- Medel, A., Ramos, S., Avelar, F. J., Godínez, L. A., & Rodríguez, F. (2008). Caracterización de Jales Mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación. *ConCiencia Tecnológica*, 35, 32–35.
- Meeker, J. D., Rossano, M. G., Protas, B., Padmanahban, V., Diamond, M. P., Puscheck, E., Daly, D., Paneth, N., & Wirth, J. J. (2010). Environmental exposure to metals and male reproductive hormones: circulating testosterone is inversely associated with blood molybdenum. *Fertility and Sterility*, 93(1), 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.09.044>
- Møller, A. P., Garamszegi, L. Z., Gil, D., Hurtrez-Boussès, S., & Eens, M. (2005). Correlated evolution of male and female testosterone profiles in birds and its consequences. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 58(6), 534–544. <https://doi.org/10.1007/s00265-005-0962-2>
- Møller, Anders Pape. (1987). Variation in badge size in male house sparrows *Passer domesticus*: evidence for status signalling. *Animal Behaviour*, 35(6), 1637–1644. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(87\)80056-8](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(87)80056-8)

- Monaghan, P., Metcalfe, N. B., & Torres, R. (2009). Oxidative stress as a mediator of life history trade-offs: Mechanisms, measurements and interpretation. *Ecology Letters*, *12*(1), 75–92. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01258.x>
- Montgomerie, R. (2006). Analyzing Colors. In G. E. Hill & K. J. McGraw (Eds.), *Bird Coloration, Volume 1: Mechanisms and Measurements* (pp. 90–147). Harvard University Press.
- Murphy, T. G., Hernández-Muciño, D., Osorio-Beristain, M., Montgomerie, R., & Omland, K. E. (2009). Carotenoid-based status signaling by females in the tropical streak-backed oriole. *Behavioral Ecology*, *20*(5), 1000–1006. <https://doi.org/10.1093/beheco/arp089>
- Navara, K. J., & Hill, G. E. (2003). Dietary carotenoid pigments and immune function in a songbird with extensive carotenoid-based plumage coloration. *Behavioral Ecology*, *14*(6), 909–916. <https://doi.org/10.1093/beheco/arg085>
- Niecke, M., Rothlaender, S., & Roulin, A. (2003). Why do melanin ornaments signal individual quality? Insights from metal element analysis of barn owl feathers. *Oecologia*, *137*(1), 153–158. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1307-3>
- Osmond, M. M., Reudink, M. W., Germain, R. R., Marra, P. P., Nocera, J. J., Boag, P. T., & Ratcliffe, L. M. (2013). Relationships between carotenoid-based female plumage and age, reproduction, and mate colour in the American redstart (*setophaga ruticilla*). *Canadian Journal of Zoology*, *91*(8), 589–595. <https://doi.org/10.1139/cjz-2013-0017>
- Pacyna, A. D., Ruman, M., Mazerski, J., & Polkowska, Ż. (2018). Biological responses to environmental contamination. How can metal pollution impact signal honesty in avian species? *Ecology and Evolution*, *8*(15), 7733–7739. <https://doi.org/10.1002/ece3.4192>
- Peneaux, C., Hansbro, P. M., & Griffin, A. S. (2020). The potential utility of carotenoid-based coloration as a biomonitor of environmental change. *Ibis*, *163*(1), 1–18. <https://doi.org/10.1111/ibi.12866>
- Pérez-Rodríguez, L. (2009). Carotenoids in evolutionary ecology: Re-evaluating the antioxidant role. *BioEssays*, *31*(10), 1116–1126. <https://doi.org/10.1002/bies.200900070>
- Pryke, S. R., Lawes, M. J., & Andersson, S. (2001). Agonistic carotenoid signalling in male red-collared

- widowbirds: Aggression related to the colour signal of both the territory owner and model intruder. *Animal Behaviour*, 62(4), 695–704. <https://doi.org/10.1006/anbe.2001.1804>
- Quinlan, S. P., & Green, D. J. (2012). Riparian habitat disturbed by reservoir management does not function as an ecological trap for the yellow warbler (setophaga petechia). *Canadian Journal of Zoology*, 90(3), 320–328. <https://doi.org/10.1139/Z11-138>
- Ramírez-Albores, J. E., & Ramírez-Cedillo, M. G. (2002). Avifauna de la región oriente de la sierra de Huautla, Morelos, México. *Anales Del Instituto de Biología. Serie Zoología*, 73(1), 91–111.
- Romero, F. M., & Ruíz, M. G. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43–53.
- Roulin, A. (2015). Condition-dependence, pleiotropy and the handicap principle of sexual selection in melanin-based colouration. *Biological Reviews*, 91(2), 328–348. <https://doi.org/10.1111/brv.12171>
- Saino, N., Romano, M., Rubolini, D., Ambrosini, R., Caprioli, M., Milzani, A., Costanzo, A., Colombo, G., Canova, L., & Wakamatsu, K. (2013). Viability Is Associated with Melanin-Based Coloration in the Barn Swallow (*Hirundo rustica*). *PLoS ONE*, 8(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060426>
- Saks, L., McGraw, K., & Hõrak, P. (2003). How feather colour reflects its carotenoid content. *Functional Ecology*, 17(4), 555–561. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2003.00765.x>
- Sánchez-Virosta, P., Espín, S., García-Fernández, A. J., & Eeva, T. (2015). A review on exposure and effects of arsenic in passerine birds. *Science of the Total Environment*, 512–513(January 2016), 506–525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.069>
- Servicio Geológico Mexicano. (2018a). Panorama minero del estado de Guerrero. *Panorama Minero de Los Estados*, 59. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/CHIHUAHUA.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano. (2018b). Panorama minero del estado de Morelos. *Panorama Minero de Los Estados*, 40. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/MORELOS.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano. (2018c). Panorama Minero del estado de Oaxaca. *Panorama Minero de Los Estados*, 1–64.

- Soto-Ríos, M. de L., Juárez-Pérez, C. A., Rendón-Gandarilla, F. J., Talavera-Mendoza, O., & Aguilar-Madrid, G. (2017). Elevated blood lead levels in children associated with living near mining waste sites in Guerrero/Mexico. *Environments - MDPI*, *4*(2), 1–9. <https://doi.org/10.3390/environments4020041>
- Strode, S., Jaeglé, L., & Selin, N. E. (2009). Impact of mercury emissions from historic gold and silver mining: Global modeling. *Atmospheric Environment*, *43*(12), 2012–2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.006>
- Urán, M. E., & Cano, L. E. (2008). Melanina: implicaciones en la patogénesis de algunas enfermedades y su capacidad de evadir la respuesta inmune del hospedero. *Infectio*, *12*(2), 357–377.
- Weaver, R. J., Koch, R. E., & Hill, G. E. (2017). What maintains signal honesty in animal colour displays used in mate choice? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *372*(1724). <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0343>
- Weaver, R. J., Santos, E. S. A., Tucker, A. M., Wilson, A. E., & Hill, G. E. (2018). Carotenoid metabolism strengthens the link between feather coloration and individual quality. *Nature Communications*, *9*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02649-z>
- Zahavi, A. (1975). Mate selection-A selection for a handicap. *Journal of Theoretical Biology*, *53*(1), 205–214. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(75\)90111-3](https://doi.org/10.1016/0022-5193(75)90111-3)
- Zduniak, P., Surmacki, A., Erciyas-Yavuz, K., Chudzińska, M., & Barałkiewicz, D. (2014). Are there different requirements for trace elements in eumelanin- and pheomelanin-based color production? A case study of two passerine species. *Comparative Biochemistry and Physiology -Part A : Molecular and Integrative Physiology*, *175*(1), 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2014.05.019>

Anexos

Anexo 1. Tabla de selección de modelos para las 14 variables respuesta de coloración carotenoide, eumelánica y feomelánica.

Variable respuesta	N	Efectos fijos	gl	LogLik	AICc	Δ AICc	Peso relativo
Reflectancia estructural carotenoide dorsal	300	Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Distancia a ríos + Latitud de colecta + Longitud de colecta + DistRíosXCatNumMinas	10	-309.3442	639.6750	0.0000000	0.3037844
		Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Distancia a ríos + Latitud de colecta + DistRíosXCatNumMinas	9	-310.4649	639.7334	0.05846983	0.2950318
		Latitud de colecta + Longitud de colecta +	5	-314.7661	639.7954	0.12045436	0.2860284
		Distancia a ríos + Latitud de colecta	5	-315.6759	641.6150	1.94007138	0.1151554
Croma carotenoide absoluto dorsal	300	Sexo + Distancia a las minas + Distancia a ríos + DistMinasXSexo + DistRíosXSexo + Latitud de colecta + Mes de colecta	10	-315.6339	652.2543	0.000000	0.6332261
		Sexo + Distancia a las minas + Distancia a ríos + DistMinasXSexo + DistRíosXSexo + Latitud de colecta	9	-317.2715	653.3465	1.092164	0.3667739
Tono carotenoide dorsal	300	Sexo + Distancia a las minas + DistMinasXSexo + Longitud de colecta	7	-314.1918	642.8792	0	1
Reflectancia estructural carotenoide ventral	322	Sexo + Distancia a ríos + (DistRíos) ² + Distancia a las minas + (DistMinas) ² + Latitud de colecta + DistMinasXSexo	10	-330.9233	682.7868	0.0000000	0.3591089
		Sexo + Distancia a ríos + (DistRíos) ² + Distancia a las minas + Longitud de colecta	8	-333.1082	682.8265	0.0396597	0.3520580
		Sexo + Distancia a ríos + (DistRíos) ² + Distancia a las minas + Latitud de colecta	8	-333.3061	683.2224	0.4355539	0.2888331
Croma carotenoide absoluto ventral	322	Sexo + Distancia a las minas + (DistMinas) ² + Latitud de colecta + Longitud de colecta + DistMinasXSexo	9	-325.7715	670.3089	0.0000000	0.4290343
		Sexo + Distancia a las minas + Latitud de colecta + Longitud de colecta + DistMinasXSexo	8	-327.0119	670.6339	0.3250497	0.3646770

		Sexo + Gremio trófico + Distancia a ríos + (DistRíos) ² + Distancia a las minas + Latitud de colecta + Longitud de colecta + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + DistRíosXCatNumMinas + DistRíosXSexo + DistRíosXGremio Trófico	17	-317.5387	671.7734	1.4645198	0.2062888
Tono carotenoide ventral	322	Sexo + Distancia a las minas + Latitud de colecta + Longitud de colecta + DistMinasXSexo	8	-322.9477	662.5055	0	1
Brillo promedio de coloración eumelánica dorsal	429	Sexo + Distancia a las minas + Latitud de colecta + Mes de colecta + DistMinasXSexo	9	-504.2095	1026.926	0.0000000	0.3366617
		Sexo + Distancia a las minas + Mes de colecta + DistMinasXSexo	7	-506.6793	1027.672	0.7462710	0.2318158
		Sexo + Latitud de colecta + Mes de colecta	6	-507.7723	1027.779	0.8531743	0.2197502
		Sexo + Mes de colecta	5	-508.8431	1027.853	0.9271347	0.2117722
Pendiente de la curva de reflectancia de coloración eumelánica dorsal	429	Sexo + Distancia a ríos + DistRíosXSexo	6	-505.2026	1022.640	0.0000000	0.5338558
		Sexo	4	-507.4000	1022.911	0.2712618	0.4661442
Brillo promedio de coloración eumelánica ventral	221	Sexo + Gremio trófico + Distancia a las minas + (DistMinas) ² + DistRíosXSexo + DistMinasXSexo + DistRíosXGremio Trófico	9	-222.9321	464.9963	0.0000000	0.4705006
		Sexo + Gremio trófico + Distancia a ríos + (DistRíos) ² + Distancia a las minas + (DistMinas) ² + DistRíosXSexo + DistRíosXGremio Trófico	11	-221.1677	466.0170	1.020699	0.2824349
		Sexo + Distancia a las minas + DistMinasXSexo	6	-226.8830	466.2846	1.288295	0.2470645
Pendiente de la curva de reflectancia de coloración eumelánica ventral	221	Gremio trófico + Longitud de colecta	5	-227.1909	464.7499	0.0000000	0.7119002
		Gremio trófico	4	-229.1576	466.5592	1.809261	0.2880998
Brillo promedio de coloración feomelánica dorsal	273	Longitud de colecta	4	-290.2226	588.6422	0	1
Pendiente de la curva de reflectancia de coloración feomelánica dorsal	273	Sexo + Gremio trófico + Distancia a minas + DistMinasXSexo + DistMinasXGremio Trófico	8	-281.9048	580.5332	0.0000000	0.6721986
		Sexo + Distancia a minas + DistMinasXSexo	6	-284.7758	581.9695	1.436291	0.3278014

Brillo promedio de coloración feomelánica ventral	197	Sexo + Gremio trófico + Distancia a ríos + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Longitud de colecta + Mes de colecta + DistRiosXCatNumMinas	13	-417.7522	863.5609	0.000000	0.19783687
		Sexo + Gremio trófico + Distancia a ríos + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Longitud de colecta + DistRiosXCatNumMinas	12	-419.0505	863.8537	0.2928174	0.17089240
		Gremio trófico + Distancia a ríos + Distancia a minas + (DistMinas) ² + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Longitud de colecta + DistRiosXCatNumMinas	13	-418.2331	864.5228	0.9618576	0.12230452
		Gremio trófico + Distancia a ríos + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + (DistRios) ² + Longitud de colecta + Mes de colecta + DistRiosXCatNumMinas	13	-418.2944	864.6453	1.0843604	0.11503801
		Gremio trófico + Distancia a ríos + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Longitud de colecta + Mes de colecta + DistRiosXCatNumMinas	12	-419.4852	864.7233	1.1623567	0.11063809
		Gremio trófico + Distancia a ríos + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + (DistRios) ² + Longitud de colecta + DistRiosXCatNumMinas	12	-419.5587	864.8702	1.3093110	0.10280020
		Gremio trófico + Distancia a ríos + Categoría por número de concesiones mineras río arriba + Longitud de colecta + DistRiosXCatNumMinas	11	-420.7706	865.0160	1.4550694	0.09557470
		Sexo + Gremio trófico + Distancia a ríos + Longitud de colecta + Mes de colecta	9	-423.1290	865.2525	1.6915792	0.08491521
Pendiente de la curva de reflectancia de coloración feomelánica ventral	197	Distancia a ríos + Distancia a minas	5	-263.2361	536.7965	0.000000	0.6630097
		Distancia a ríos	4	-264.9674	538.1500	1.353471	0.3369903

Anexo 2. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en la Saturación carotenoide dorsal, en 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Melanerpes chrysogenys* (MeCh), *Pitangus sulphuratus* (PiSu) e *Icterus pustulatus* (IcPu)

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-2.21E-04	6.15E-02	2.34E+02	-0.004	0.997134	
Distancia a las minas	1.06E-01	1.37E-01	2.34E+02	0.774	0.43986	
Sexo	2.25E-01	1.25E-01	2.34E+02	1.793	0.074336	.
Distancia a los ríos	-9.95E-02	1.38E-01	2.34E+02	-0.719	0.472554	
Latitud de colecta	-4.34E-01	1.28E-01	2.34E+02	-3.403	0.000785	***
DistMinasXSexo	7.18E-01	2.66E-01	2.34E+02	2.696	0.007519	**
DistRíosXSexo	-8.34E-01	2.65E-01	2.34E+02	-3.148	0.00186	**
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' ' 1						

Anexo 3. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en el Tono dorsal de 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Melanerpes chrysogenys* (MeCh), *Pitangus sulphuratus* (PiSu) e *Icterus pustulatus* (IcPu)

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	8.16E-03	6.07E-02	2.34E+02	0.135	0.89312	
Longitud de colecta	3.31E-01	1.22E-01	2.34E+02	2.713	0.00717	**
Sexo	5.27E-01	1.24E-01	2.34E+02	4.257	3.01E-05	***
Distancia a las minas	2.76E-01	1.25E-01	2.34E+02	2.207	0.02827	*
DistMinasXSexo	5.70E-01	2.44E-01	2.34E+02	2.332	0.02055	*
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' ' 1						

Anexo 4. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en la Saturación carotenoides ventral para 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Pitangus sulphuratus* (PiSu), *Icterus pustulatus* (IcPu) y *Passerina leclancherii* (PaLe).

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	8.86E-03	6.33E-02	4.36E+01	0.14	0.88933	
Sexo	5.28E-01	1.24E-01	2.38E+02	4.276	2.75E-05	***
Latitud de colecta	-4.24E-01	1.65E-01	7.25E+01	-2.576	1.20E-02	*
Longitud de colecta	-4.92E-01	1.66E-01	6.97E+01	-2.962	0.00417	**
Distancia a las minas	1.79E-01	1.28E-01	7.75E+01	1.402	0.16493	
DistMinasXSexo	-0.623837	0.237286	238.282019	-2.629	0.00912	**
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1						

Anexo 5. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en el Tono ventral de 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Pitangus sulphuratus* (PiSu), *Icterus pustulatus* (IcPu) y *Passerina leclancherii* (PaLe).

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-1.02E-02	5.79E-02	2.45E+02	-0.175	0.86085	
Sexo	6.28E-01	1.22E-01	2.45E+02	5.139	5.64E-07	***
Latitud de colecta	-3.44E-01	1.54E-01	2.45E+02	-2.232	2.66E-02	*
Longitud de colecta	-4.98E-01	1.55E-01	2.45E+02	-3.21	0.0015	**
Distancia a las minas	2.08E-01	1.20E-01	2.45E+02	1.741	0.08293	.
DistMinasXSexo	-0.68569	0.23489	245	-2.919	0.00384	**
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1						

Anexo 6. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en la Reflectancia estructural dorsal de 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Melanerpes chrysogenys* (MeCh), *Pitangus sulphuratus* (PiSu) e *Icterus pustulatus* (IcPu).

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-6.869e-16	6.129e-02	2.340e+02	0.000	1	
Latitud de colecta	-6.462e-01	1.228e-01	2.340e+02	-5.261	3.24e-07	***
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Anexo 7. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en la Reflectancia estructural ventral de 4 especies de aves con parches carotenoides: *Basileuterus belli* (BaBe), *Pitangus sulphuratus* (PiSu), *Icterus pustulatus* (IcPu) y *Passerina leclancherii* (PaLe).

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-8.05E-02	7.09E-02	2.45E+02	-1.135	0.25762	
Sexo	3.49E-01	1.29E-01	2.45E+02	2.701	0.0074	**
Distancia a las minas	2.82E-01	1.31E-01	2.45E+02	2.149	3.26E-02	*
Distancia a los ríos	-5.25E-01	1.77E-01	2.45E+02	-2.962	0.00336	**
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Anexo 8. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en el Brillo promedio de parches eumelánicos dorsales de 9 especies de aves.

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	0.005101	0.050851	365	0.1	0.9202	
Sexo	-0.223031	0.105376	365	-2.117	0.035	*
Mes de colecta	0.233963	0.102841	365	2.275	0.0235	*
Distancia a las minas	-0.055281	0.103027	365	-0.537	0.5919	
DistMinasXSexo	0.450298	0.20893	365	2.155	0.0318	*

Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Anexo 9. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en la pendiente de parches eumelánicos dorsales de 9 especies de aves.

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	0.000193	0.050551	365	0.004	0.996956	
Sexo	-0.382515	0.104711	365	-3.653	0.000297	***
Distancia a los ríos	-0.016116	0.101717	365	-0.158	0.874198	
DistRíosXSexo	0.425267	0.205282	365	2.072	0.039002	*
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Anexo 10. Efectos fijos del LMM que mejor explicó la variación en el brillo de parches eumelánicos ventrales de 4 especies de aves.

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-0.05876	0.07421	169	-0.792	0.42955	
Sexo	-0.44996	0.15756	169	-2.856	0.00483	**
Gremio trófico	0.27304	0.29019	169	0.941	0.3481	
Distancia a las minas	-0.0565	0.17784	169	-0.318	0.7511	
DistMinasXSexo	1.04657	0.40204	169	2.603	0.01006	*
Distancia a minas: Gremio trófico	-0.47854	0.36594	169	-1.308	0.19275	
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Anexo 11. Efectos fijos del GLMM que mejor explicó la variación en la pendiente de parches feomelánicos dorsales de 5 especies de aves.

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-0.03732	0.06742	208	-0.554	0.58045	
Sexo	0.40496	0.13656	208	2.965	0.00338	**
Distancia a las minas	0.04624	0.14884	208	0.311	0.75634	

DistMinasXSexo	-0.75434	0.28143	208	-2.68	0.00794	**
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Anexo 12. Efectos fijos del GLMM que mejor explicó la variación en la pendiente de parches feomelánicos ventrales de 5 especies de aves.

	Pendiente	Error estándar	gl	t	Pr(> t)	Cs
(Intercepto)	-3.62E-17	7.01E-02	1.91E+02	0	1	
Distancia a los ríos	-3.76E-01	1.41E-01	1.91E+02	-2.677	0.00808	**
Códigos de significación (Cs): 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						