Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca

Memòria justificativa de recerca de les convocatòries BE, PIV, BCC, NANOS i BP

La memòria justificativa consta de les dues parts que venen a continuació:
1.- Dades bàsiques i resums
2.- Memòria del treball (informe científic)

Tots els camps són obligatoris

1.- Dades bàsiques i resums

Nom de la convocatòria

BE

Llegenda per a les convocatòries:

BCC	Convocatòria de beques per a joves membres de comunitats catalanes a l'exterior (BCC)
BE	Beques per a estades per a la recerca fora de Catalunya (BE)
BP	Convocatòria d'ajuts postdoctorals dins del programa Beatriu de Pinós (BP)
NANOS	Beques de recerca per a la formació en el camp de les nanotecnologies (NANOS)
PIV	Beques de recerca per a professors i investigadors visitants a Catalunya (PIV)

Títol del projecte: ha de sintetitzar la temàtica científica del vostre document.
Coloración estructural del plumaje: influencia de la dieta y aplicaciones en conservación de aves

Dades de l'investigador

Nom
JAVIER

Cognoms
QUESADA LARA

Correu electrònic
jquesada@yahoo.es

Dades del centre d'origen

Museu de Ciències Naturals (doctorat per l'Universitat de Barcelona, Dpt. Biologia Animal)

Número d'expedient
2006 BE 00711

Paraules clau: cal que esmenteu cinc conceptes que defineixin el contingut de la vostra memòria.
coloración estructural, Passerina caerulea, mecanismos proximos, señalizacion, ornamentos sexuales

Data de presentació de la justificació
27-07-2007

Resum del projecte: cal adjuntar dos resums del document, l'un en anglès i l'altre en la llengua del document, on s'esmenti la durada de l'acció

Resum en la llengua del projecte (màxim 300 paraules)

Diversos estudis suggereixen que produir les coloracions estructurals de les aus és costós ja que els individus amb major condició física desenvolupen ornamentacions més vistoses, però les evidències experimentals són molt poques. El primer objectiu va ser demostrar experimentalment la influència de la dieta sobre la coloració estructural. A més, aquesta relació també té un interès aplicat com a bioindicador. S'ha comprovat que la coloració del plomatge varia segons la condició física i nutricional, i també de la qualitat de l'hàbitat on es desenvolupa l'animal. Un altre dels objectius del present projecte va ser explorar la potencialitat de l'ús de la coloració del plomatge com a indicador de la salut (condició física) d'una població en un àrea determinada i, per tant, de la idoneïtat d'aquest hàbitat per l'espècie.

Des d'abril a octubre del 2006 es va realitzar un estudi a la conca de Cuitzeo, Michoacan (México), en dues àrees amb diferent grau de pertorbació. Als individus es va realitzar la mesura de dades biomètriques i de coloració estructural del plomatge del pit. Els mascles de P. Caerulea van ser portats a captivitat i a l'època de muda se'ls va administrar als dos grups una dieta baixa en proteïnes i un altra dieta control respectivament, mesurant la coloració una vegada els animals haguessin mudat.

Aquells individus de P. Caerulea que van rebre la dieta baixa en proteïnes van mostrar una coloració de pitjor qualitat. Aquells individus de P.caerulea com A. Beryllina capturats a les zones amb major pertorbació van mostrar una qualitat del plomatge pitjor. Els resultat accentuen la influència de l'ambient en l'expressió de la coloració estructural del plomatge, i a més compleixen el prerrequisit que la coloració blava del mascle de P.caeruela és costosa. Les dades també suggereixen que la coloració estructural pot utilitzar-se com a bioindicador.

Resum en anglès(màxim 300 paraules)

Different studies suggest that the production of structural colorations in birds is costly since only the individuals with a better body condition display more striking plumage but the experimental evidences are scarce. Our first aim was to test from an experimental whether the diet quality affect the structural coloration of birds. In addition, this relation also has an applied interest as biological indicator. It has been demonstrated that plumage coloration not only varies according to the body and nutritional condition but also to the quality of the habitat where the animal moults. Hence, our second aim was to explore the potentiality of the use of the plumage coloration as indicator of the health (body condition) of a population in a particular area and, therefore, of the suitability of that one habitat for such species.
During April to October of 2006 a study was made in the Cuitzeo basin, Michoacán (Mexico) where we captured individuals of Passerina caerulea and Amazilia beryllina in two areas with different degree of disturbance. We took biometric and plumage coloration data. The males of P. caerulea were kept in captivity and two groups which were feed with a low protein and a control diet respectively during moult. Those individuals of P.caerulea which received the low protein diet showed worse plumage coloration in relation to control ones. Also, those individuals of P. caerulea and A. beryllina living in more disturbed areas showed a duller plumage colouration than those living in more conserved areas. Our results accentuate the environmental dependence of the structural plumage expression and show that producing structural plumage is costly. The data also suggest that structural coloration could be used as biological indicator.

2.- Memòria del treball (informe científic sense limitació de paraules). Pot incloure altres fitxers de qualsevol mena, no més grans de 10 MB cadascun d'ells.

COLORACIÓN ESTRUCTURAL DEL PLUMAJE: INFLUENCIA DE LA DIETA EN LA EXPRESIÓN DEL COLOR DE LAS PLUMAS Y APLICACIONES EN LA CONSERVACIÓN

JAVIER QUESADA

Museo de Ciències Naturals de Barcelona (Cataluña, España)

RESUMEN

Diversos estudios sugieren que producir las coloraciones estructurales de las aves es costoso ya que los individuos con mejor condición física despliegan ornamentaciones más vistosas, pero las evidencias experimentales son muy escasas. El primer objetivo fue demostrar experimentalmente la influencia de la dieta sobre la coloración estructural. Además, esta relación también tiene un interés aplicado como indicador biológico. Se ha comprobado que la coloración del plumaje varía según la condición física y nutricional, y también de la calidad del hábitat donde se desarrolla el animal. Otro de los objetivos del presente proyecto fue explorar la potencialidad del uso de la coloración del plumaje como indicador de la salud (condición física) de una población en un área determinada y, por tanto, de la idoneidad de ése hábitat.

Durante abril a octubre de 2006 se realizó un estudio en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán (México) donde se capturaron individuos de *Passerina caerulea* y *Amazilia beryllina*) en dos áreas con diferente grado de perturbación. A estos individuos se les tomó datos biométricos y de coloración estructural del plumaje del pecho. Los machos de *P. caerulea* fueron llevados a cautividad y en la época de muda se les administró a dos grupos una dieta baja en proteína y otra dieta control respectivamente midiéndose la coloración una vez los animales hubieran mudado.

Aquellos individuos de *P. caerulea* que recibieron la dieta baja en proteína mostraron una coloración de peor calidad. Aquellos individuos de *P. caerulea* como *A. beryllina* capturados en las zonas con mayor perturbación mostraron una calidad el plumaje peor. Los resultados acentúan la regulación entorno dependiente de la expresión del coloración estructural y cumplen el

prerrequisito de que la coloración azul del macho de *P. caeruela* es costosa. Los datos también sugieren que la coloración estructural puede usarse como indicador biológico.

INTRODUCCIÓN

Una de las características principales de las aves es la gran vistosidad y variabilidad en la coloración de su plumaje. El posible valor adaptativo y de comunicación de la coloración en el plumaje de las aves ha sido discutido desde los tiempos de Darwin (Darwin, 1871). Sin embargo, no fue hasta finales de la década de los ochenta cuando se analizó experimentalmente esta posible función del color del plumaje (Butcher and Rohwer, 1989; Savalli, 1995; Hill, 1999b).

Collias et al. (1979), Røskaft & Jarvi (1983), Lifjeld & Slagsvold (1988) y Møller (1989) fueron de los primeros en demostrar que los machos de muchas especies de aves señalizan su calidad mediante la coloración del plumaje y que las hembras utilizan estas características para escoger pareja. En los mismos años, Rohwer (Rohwer 1975; Rohwer, 1977; Rohwer and Rohwer, 1978) propuso que algunas manchas de color podían ser utilizadas como señales de estatus social; de esta forma, al reconocer la habilidad para la lucha del oponente, los pájaros evitarían incurrir en innecesarias y peligrosas peleas. La segunda mitad de los años noventa se ha caracterizado por una gran producción científica en este campo (Savalli, 1995; Olson and Owens, 1998; Cuthill et al., 1999; Senar, 1999; Hill, 1999b; Espmark et al., 2000).

Existen dos tipos principales de coloraciones en las plumas: 1) aquellas basadas en pigmentos y 2) las denominadas coloraciones estructurales (Brush, 1978). Las coloraciones pigmentarias son aquellas que son consecuencias de la deposición de pigmentos, carotenoides y melaninas principalmente, que proporcionan una coloración característica a la pluma (Hill and McGraw, 2006). Se ha demostrado que las coloraciones amarillas o rojas del plumaje proceden de la inclusión de carotenoides dentro de la dieta de las aves (Slagsvold and Lifjeld, 1985; Partali et al., 1987). Las coloraciones basadas en melaninas sin embargo son las responsables de las coloraciones negras, marrones y algunas coloraciones típicas naranjas o amarillas (Brush, 1978; Roulin and Dijkstra, 2003). Que algunos colores, como el rojo y el amarillo, sean adquiridos a través

de la dieta implica que los animales con coloraciones más brillantes en estos tonos, deben ser más hábiles en conseguir estos compuestos (Olson and Owens, 1998). Esto ha llevado a sugerir que la intensidad de la coloración por pigmentos en las plumas puede usarse con indicador ambiental (Hill, 1995).

Por otra parte, las coloraciones estructurales son consecuencia de la reflexión de la luz en la matriz estructural de la pluma y es el tipo de coloración que produce los colores azules, verdes-violeta, blancos y la coloración iridiscente de muchas aves (Fox, 1976; Prum, 1999). Este tipo de coloración hasta hace unos años había recibido muy poca atención y no fue hasta la década de los noventa que se sugirió que, al igual que las coloraciones pigmentarias, las coloraciones estructurales podían constituir señales con valor ecológico y evolutivo (Bennett et al., 1997; Prum, 1999; Hunt et al., 1999; Keyser and Hill, 2000; Johnsen et al., 2003; Senar, 2004; Alonso-Alvarez et al., 2004; Prum, 2006).

Según Prum (Prum, 1999), existen tres tipos principales de coloraciones producidas por la estructura de la pluma: 1) Plumas de color blanco, que son consecuencia de la refracción incoherente de la luz en plumas no pigmentadas que están compuestas exclusivamente por una matriz de queratina. 2) Coloración iridiscente, que se produce a causa de una disposición ordenada de las bárbulas de la pluma que origina una refracción coherente de la luz, lo que determina que la coloración observada en la pluma cambie según el ángulo de observación. La iridiscencia es producida por la interacción de gránulos o capas de melanina y capas de burbujas aire distribuido en la queratina de esta bárbulas y, 3) coloraciones cromáticas no iridiscentes, que son consecuencia de la disposición particular de la barba de la pluma y que proporciona las coloraciones no iridiscentes de colores azules, violetas, verdes y ultravioletas. Estas coloraciones son consecuencia de la interacción de la estructura queratinosa y gránulos de melanina. Aunque estos dos últimos tipos de coloración contienen pigmentos (gránulos de melanina), deben considerarse como coloraciones estructurales puesto que las propiedades del color reflejado

son consecuencia del tamaño, distribución espacial y los índices refractados de los gránulos de pigmento (melanina), pero no de las propiedades moleculares de estos, como ocurre en las coloraciones pigmentarias basadas en melaninas mencionadas anteriormente (Prum, 1999; Prum, 2006).

Diversos estudios han demostrado que las coloraciones estructurales podrían estar sujetas tanto a selección natural como sexual, debido a que en algunas especies éstas coloraciones juegan un importante papel como señales de una cualidad determinada en la elección de pareja y en las interacciones sociales entre los miembros de una especie social (Alonso-Alvarez et al., 2004; Amundsen and Pärn, 2006; Griffith and Pryke, 2006; Bortolotti, 2006; Hill, 2006b). Zahavi (1975) propuso la teoría del "handicap", donde sugiere que para que un ornamento funcione como una señal confiable del estado del individuo, éste ha de ser costoso de producir o mantener. De este modo, los costos de producción de la coloración iridiscente en aves podrían explicar la varianza encontrada al medir la coloración de su plumaje. Si existe un factor limitante que condicione la expresión del color en las plumas (p.ej. alimento de calidad), y no todos los individuos puedan acceder a él por igual, esto debería plasmarse en la coloración del plumaje de manera que solo los individuos de mejor calidad podrían llegar a tener acceso a este recurso de forma óptima y por tanto conseguir una coloración más brillante (Promislow et al., 1992; Johnstone and Norris, 1993; Veiga, 1995; Haskell, 1996; Olson and Owens, 1998; Hill, 1999a).

En el caso de las coloraciones estructurales la mayoría de los trabajos se han centrado en el posible papel del ambiente de manera correlacional. El único estudio hasta ahora realizado a este respecto sugiere que las coloraciones iridiscentes son afectadas por los endoparásitos (Hill et al., 2005), no se conoce prácticamente nada sobre el papel que juega la calidad de la alimentación ni los mecanismos próximos que determinan la varianza encontrada en este tipo de coloración. Solo existe un estudio experimental sobre la influencia de la dieta en la coloración estructural (McGraw et al., 2002) pero recomendaciones previas sugieren la necesidad de dar una generalización mayor a estos resultados en otras especies (Hill, 2006a).

Un estudio de carácter experimental en el que se determine el efecto del alimento en las coloraciones estructurales nos permitiría responder si la coloración estructural es costosa de producir. Ya que las coloraciones iridiscentes dependen de la estructura de la matriz de queratina de la pluma y, además, el crecimiento de ésta última se encuentra bajo un estricto control de los tejidos adyacentes del folículo (Mcgraw, 2002), podemos esperar que cualquier perturbación en la condición física a través de la dieta afectará al desarrollo de la pluma y por tanto la expresión del color del plumaje. De hecho la ptilocronología es una técnica que utiliza las barras de crecimiento de las plumas para determinar el estatus nutricional individuo (Grubb, 1989) (Grubb, 1995) por lo que la relación entre condición física y crecimiento de las plumas esta ampliamente demostrada. Ya que la condición física depende en gran medida del contenido proteico de la dieta, la cantidad de proteína en la dieta debe jugar un papel crucial para determinar la coloración del plumaje del ave (Pehrsson, 1987).

El hecho de que la coloración del plumaje dependa del alimento ingerido y por lo tanto, de la condición física del individuo, puede tener también un interés aplicado. El plumaje de las aves puede usarse como indicador de la condición física de distintas poblaciones de una misma especie o de la calidad del entorno en el que se desarrolla una población dada. Debido a que la expresión de algunas coloraciones del plumaje, como aquellas basadas en carotenos varían mucho según la condición física del individuo (Hill et al., 2002), estas son extremadamente sensibles a los cambios del ambiente, y recientemente se ha sugerido que podrían ser unos excelentes bioindicadores ambientales (Hill, 1995). Una sutil disminución de la calidad ambiental puede provocar una rápida reducción en la expresión del ornamento en la población. En varias especies se ha comprobado que la intensidad de la coloración del plumaje varía según la condición física y nutricional, y la calidad del hábitat donde se desarrolla el animal (Andersson, 1994). Si las hembras utilizan estos ornamentos para valorar la condición física de los machos de su misma especie, ya sea para determinar su calidad reproductiva o su dominancia en interacciones

agonísticas (Andersson, 1994), estos caracteres podrían ser utilizados como importantes bioindicadores ambientales. Hasta ahora solo se ha estudiado el papel de los carotenos como indicadores de condición física de una población en un área determinada, o como indicadores de la calidad de una zona (Senar, 2004).

El campo de la coloración del plumaje como indicador ambiental está todavía en sus inicios, pero es un área de estudio que se considera muy prometedora (Hill, 2002; Senar, 2004). Las posibilidades o limitaciones de utilizar la coloración del plumaje en general y de la coloración estructural en particular como indicadores de la condición física poblacional, y de la calidad del hábitat donde estas habitan no han sido exploradas.

Senar (2004) expone para que la coloración del plumaje se pueda usar como herramienta ambiental se deben identificar las especies y ornamentos potencialmente mas útiles, y entender como los factores ambientales afectan al plumaje. Unos de los objetivos de este proyecto fue explorar el potencial que las coloraciones estructurales (iridiscentes y no iridiscentes) tienen como indicadores de la salud de poblaciones de aves de diferentes especies, y por lo tanto, también como indicadores de calidad ambiental de zonas degradadas.

Así, las hipótesis y predicciones que se desprenden de estos objetivos son:

Hipótesis 1: ***Influencia de la dieta en la expresión de la coloración estructural.*** Las coloraciones estructurales son entorno-dependientes, e indicadoras del estado nutricional del individuo y por lo tanto pueden usarse como señal de la condición física del individuo por sus congéneres. La cantidad de proteína y micronutrientes en la dieta determinarán la calidad final del plumaje, y la intensidad de su coloración estructural.

Predicción 1: Aquellos individuos con este tipo de coloración que durante el periodo de muda tengan una dieta subóptima baja en proteínas expresarán un color estructural del plumaje menos colorido que aquellos que obtengan una dieta optima. Esto confirmaría el papel este tipo de coloración como señal de

condición física individual y la proteína como causante de la alteración en la formación de la pluma.

Hipótesis 2: ***Coloración estructural como indicador de la calidad física de las poblaciones de aves.*** Debido a que dentro de un mismo tipo de vegetación, las condiciones varían generando un mosaico donde hay diferentes niveles de calidad de hábitat, podemos esperar que diferentes poblaciones de aves presenten distintos niveles de calidad física. Aves localizadas en áreas de hábitat que sean idóneas para la supervivencia de su especie (áreas de alta calidad), tendrán un plumaje con coloración más intensa que poblaciones de aves utilizando áreas de calidad subóptima. Por lo tanto, si la coloración estructural refleja la condición física de los individuos, debe permitirnos identificar el estado físico de diferentes poblaciones.

Predicción 2: Aquellas poblaciones que se encuentren en áreas de peor calidad para la especie deberán mostrar una coloración estructural más apagada que aquella que ocupen áreas óptimas. Esperamos encontrar diferentes niveles de calidad del plumaje/individuo dentro de un área geográfica, asociados a la variación en calidad del hábitat.

PLAN DE TRABAJO

Área de estudio:

La zona de estudio comprendió la parte alta de la cuenca del lago de Cuitzeo, cerca de la ciudad de Morelia, (estado de Michoacán. Esta cuenca cuenta con un diverso mosaico de hábitats con diferentes grados de perturbación. La definición de los sitios de captura escogidos a través de estudios previos (MacGregor et al., datos no publicados) permitieron por una parte establecer las zonas donde se capturarían los individuos de la Hipótesis 2 (color como indicador de salud) y por otra parte recolectar aquellos individuos que se utilizarían en los experimentos en cautividad (efecto de la dieta en el color de las plumas). De esta manera se visitaron 37 puntos muestreo por toda la cuenca y se exploraron 8 más dentro de la ciudad y alrededores. Durante el mes de abril se realizó una visita exhaustiva de todos los puntos para poder definir que sitios serían los más adecuados para poder llevar a cabo la hipótesis 2 y capturar los individuos para la hipótesis 1. Finalmente los puntos considerados fueron:

Zona Urbana-Suburbana:

- Universidad Latina de América: Corresponde a zonas abandonadas donde ha crecido vegetación ruderal y está rodeada de edificios. Finalmente desestimada por falta de capturas de las especies consideradas.
- Centro de estudios en Ecosistemas (Cieco): Corresponde a un bosque no nativo de eucaliptos y está rodeada de edificios.

Zonas de Degradación baja-conservada:

- Ejido de Chiquimitío: Esta zona comprende un mosaico de matorral conservado con parches de bosque de encino.

Figura 1. Localización de las zonas de estudio en el Estado de Michoacán. (Fuentes: Google Earth, Secretaría de Gobernación del Gobierno de México)

Especies consideradas:

Las especies iniciales que se consideraron a priori fueron *Eugenes fulgens* y *Melanotis caerulescens*. Sin embargo, el uso de estas especies vendría dado por el tamaño muestral y la disponibilidad especies en las zonas con diferente valor de perturbación. Finalmente y debido a estos factores se optó por cambiar las especies de estudio ya que se obtuvieron tamaños muestrales mayores que los que se obtuvieron con las especies que inicialmente se consideraron. Estas especies fueron el Colibrí berilo *Amazilia berillyna* y y el Picogrueso azul *Passerina caerulea* (ver Anexo1) las cuales se ajustaban bien a la coloración estructural objetivo del proyecto. *Amazilia berillyna es* una especie de colibrí que presenta coloración iridiscente, dimorfismo sexual en plumaje, presenta

una muda anual y no realiza movimientos migratorios (Howell and Webb 1995). Esta especie se usó para la hipótesis 2.

Passerina caerulea presenta coloración no iridiscente, dimorfismo sexual en plumaje, es fácil de mantener en cautiverio presenta una muda de cuerpo anual y no realiza movimientos migratorios (Howell and Webb 1995). *P. caerulea* fue utilizada para evaluar las hipótesis 1 y 2 .

Captura de los animales en las zonas seleccionadas:

Se realizó la captura de las aves en las zonas seleccionadas, utilizando 8-12 redes ornitológicas de 12 m, con una luz de malla de 36 mm. Las redes se operaron desde el amanecer hasta 6 horas después de abiertas.

A todas las especies de interés se les tomaron medidas biométricas (tarso, ala, pico, cola y pesos) y de coloración de plumaje. En este sentido se colectaron plumas del pecho del mismo punto que se guardaron en bolsitas sin contacto de la luz y el aire para posterior análisis con espectrofotómetro.

Todos los individuos capturados fueron anillados para su identificación individual.

Mantenimiento en cautividad

Para la hipótesis 1 (influencia del dieta en al coloración estructural) se fabricaron las jaulas para albergar las especies que serían utilizadas para probar esta hipótesis (ver Anexo1). Las jaulas fueron situadas dentro de una habitación aislada del laboratorio donde se mantuvieron los individuos aislados de molestias externas y con luz natural y temperatura constante (Tª χ±Error.Est.= 21,95 ±1,23; Max=31; Min= 17). El número de jaulas fabricadas fue de 30. Las jaulas tenían una dimensión de 60cm x 60cm x 36cm y se prepararon para la siguiente fase de captura de los individuos de cara a probar la hipótesis 1.

Todo los individuos machos adultos de *P.caerulea* (N=16) que se capturaron fueron llevados a cautividad. Para ello se les alojó individualmente y durante al menos dos semanas fueron alimentados *ad libitum* con alpiste compuesto y semilla de girasol pelada. Cada dos semanas se les daba un suplemento vitamínico y una vez al mes se les desparasitaba para eliminar coccidias intestinales (Ballentine and Hill, 2003).

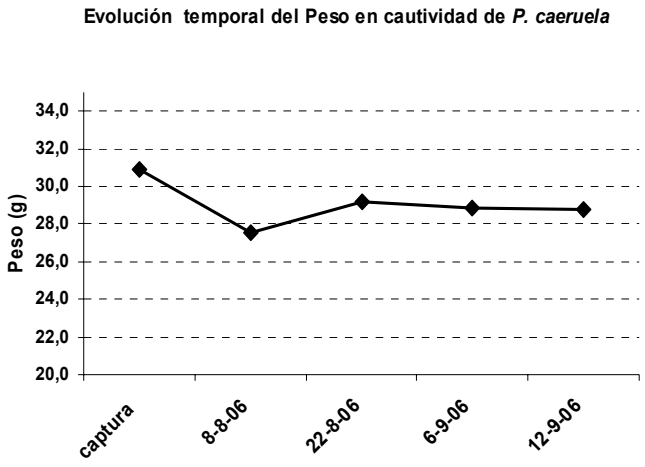

Figura 2. *Evolución del peso de los individuos de P. caerulea mantenidos en cautividad*

Durante todo el proceso de habituación se monitoreó de forma periódica el peso de los individuos en cautividad como indicador de estado de salud. Los datos sugieren la cautividad no afectó negativamente la condición física, tal y como se muestra en la Figura 2.

Dietas:

Se utilizaron dos dietas experimentales. Las dietas fueron diferentes en su contenido de energía en forma de carbohidratos simples (glucosa, fructosa, sacarosa) y en su contenido de proteínas: 1) dieta control, la cual tenía un contenido de proteína balanceada según bibliografía previa y un contenido estándar de carbohidratos, 2) dieta proteína (-), con un contenido alto de carbohidratos (para hacer las dietas isocalóricas) y un contenido bajo de proteína basándonos en sus diferentes requisitos mínimos de nitrógeno basándose en (Poston et al., 2005) (modificado) (Tabla 1).

PASSERINA CAERULEA	en %	
	PROTEÍNA+	AZUCAR+
Hidrosilato de Soya	**12,0**	**6,0**
Nekton S	5,5	5,5
NaCO3	1,0	1,0
Coline Chloride	0,2	0,2
Aceite vegetal (de maíz)	7,0	7,0
Aceite de hígado de bacalao	1,0	1,0
Celulosa	5,0	0,0
Tierra de Silica	5,0	5,0
Harina de maíz	**63,3**	**74,3**
	100,0	100,0

Tabla1*. Dietas artificiales diseñadas para testar la hipótesis de la influencia de la dieta en la expresión de la coloración del plumaje estructural en P. caerulea*

La elaboración de la dieta se realizó semanalmente y se mantenía en congelador hasta el día de uso.

Medición del color.

Se tomaron fotografías digitales tanto en campo (hipótesis 1 y 2) como posteriormente al tratamiento de la dieta (hipótesis 1). Las variables de color estructural de las plumas se midieron mediante el programa Photoshop 8.0 a través de fotografía digital que calcula las variables de color de Luminosidad, Saturación y Tono (ver Anexo1) (Quesada & Senar (2006).

Análisis estadístico de los datos

Previo al análisis de los objetivos propuestos las variables de color de las dos especies de estudio (*A. Berillyna y P. caerulea*) se resumieron en sendos análisis de componentes principales (PCA) en los cuales se resumieran la calidad del color de los individuos. Se consideraron aquellos ejes cuyo autovalor fuera mayor de 1.

Para testar la influencia de la dieta en la expresión de la coloración estructural se realizó un modelo general linear de ANOVA de medidas repetidas cuyo

factor fue: tratamiento de dieta (Control, Proteina -) y como nivel del factor la coloración del plumaje antes y después de la dieta (PCA).

Para testar el uso de la coloración estructural como indicador de la calidad física de las poblaciones de aves se compararon los valores del PCA de los individuos capturados entre las distintas áreas de perturbación tanto para *A. beryllina* y *P. caerulea*. A través de un modelo general linear de ANOVA-una sola vía donde el factor fue localidad y como nivel del factor el PCA de la coloración de las plumas del pecho de cada especie.

RESULTADOS

Las variables de color se relacionaron en torno al mismo eje el cual explicaba una gran proporción de la varianza explicado por la variables originales (Tabla 2).

	Passerina caerulea			*Amazilia Beryllina*		
	PC1	**Comunalidades**	**R^2**	**PC1**	**Comunalidades**	**R^2**
Luminosidad	0,46	0,21	0,08	0,94	0,65	0,35
Saturación	0,93	0,86	0,73	0,84	0,71	0,66
Tono	0,95	0,90	0,74	0,96	0,91	0,73
Expl.Var	1,97			2,26		
Prp.Totl	0,66			0,86		

Tabla 2. *Análisis de Componentes principales (PCA) de las especies consideradas. Los valores de color se colapsaron en un mismo eje para los especies.*

Influencia de la dieta en la expresión de la coloración estructural.

Los resultados obtenidos revelaron que el contenido de proteína en la dieta afectó significativamente la coloración desplegada por los individuos de *P. caerulea*. Aquellos individuos que tuvieron una dieta con menor contenido en proteína desarrollaron un valor de coloración peor que aquellos individuos que estuvieron sometidos a una dieta mas pobre en proteína (Tabla 3, Fig 3.)

GLM Modelo F=6.14; p<0.01
N=16

	F	**p**
Intercept	0,93	0,34
TRATAMIENTO	11,86	0,001
COLORACIÓN	0,97	0,33
COLORACIÓNxTRATAMIENTO	5,18	0,03
Error		

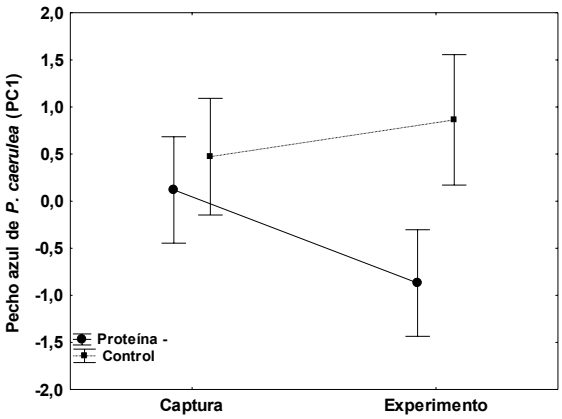

Tabla 3, Figura 3.
Efecto de la dieta sobre la coloración del plumaje. Aquellos individuos que tuvieron una dieta baja en proteínas desplegar un color menos intenso.

Uso de la coloración estructural como indicador de la calidad física de las poblaciones de aves

Los resultados mostraron que tanto para *P. caerulea* como para *A. berylllina* el grado de perturbación del hábitat afectó la coloración del plumaje. En aquellas zonas mas degradas (Cieco) los individuos tuvieron una coloración menos llamativa que aquellos de la más conservadas (Chiquimitio) (Tabla 4, Figura 4). Además, aquellos individuos que se encontraban zonas mas conservadas tenían una mejor condición física que aquellos que se encontraban en zonas mas degradas siendo estos efectos similares para las dos especies (Tabla 4).

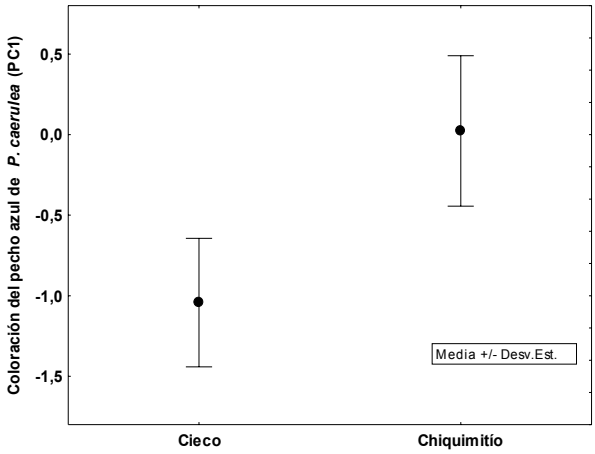

***Figura 4**. Coloración del plumaje del pecho del P. caerulea en zonas degradadas (Cieco) y en zonas conservadas (Chiquimitío)*

GLM Modelo F=6.14; p<0.01 N=16	**Passerina cauerulea**		**Amazilia berylllina**	
	F	**p**	**F**	**p**
Coloración del pecho				
GLM Modelo F=7.83; p=0.01; N=16			GLM Modelo F=4.85 p=0.03 ; N=12	
Intercept	0,06	0,82	0,12	0,74
DATA	0,06	0,81	0,12	0,73
ZONA	12,17	0,003	9,68	0,01
Indice de Winkler				
GLM Modelo F=7.71; p=0.01; N=16			GLM Modelo F=10.15; p=0.01 ; N=12	
Intercept	0,06	0,82	1,45	0,26
DATA	0,06	0,81	1,96	0,19
ZONA	12,17	0,003	19,84	0,001

***Tabla 4**. GLM ANOVA's en los cuales se compara la coloración estructural del plumaje y un índice de condición física (Winkler) para dos especies residentes entre dos zonas con diferentes grados de perturbación, una zona conservada (Chiquimitío) y una zona degradada (Cieco)*

DISCUSIÓN

La gran variabilidad y vistosidad del plumaje de las aves no se puede explicar únicamente mediante procesos de selección natural (Darwin, 1871; Andersson, 1994; Hill, 2006b). Hoy día existen numerosas evidencias de que algunas llamativas manchas de color y estructuras del plumaje en las aves funcionan como señales que denotan la calidad de un individuo (Hill, 2006b). Sin embargo, un premisa necesaria para que una señal indique una cualidad es que ha de ser honesta y esta honestidad de una señal puede demostrarse a través de lo costoso que sea producirla ya que solo algunos individuo tendrán la capacidad o los recursos necesario para producirla (Zahavi, 1975).

Diversos estudios sugieren que producir las coloraciones estructurales es costoso ya que los individuos con mejor condición física despliegan ornamentaciones más vistosas que las presentadas por individuos con una condición física inferior (Keyser and Hill, 2000; McGraw et al., 2002; Doucet and Montgomerie, 2003; Alonso-Alvarez et al., 2004; Siefferman and Hill, 2005). Sin embargo, la mayoría de los trabajos que tratan de establecer una relación entre los valores de la coloración estructural y la condición física de las aves son de carácter correlacional, por lo que no se puede establecer una relación causa-efecto entre la condición física y la expresión de la ornamentación en el plumaje.

Un elemento fundamental par tener una buena condición física es tener una buena dieta. Aunque existen evidencias de que aquellos individuos que tienen un mejor plumaje desarrollan en la muda una coloración estructural de plumaje de mayor calidad las evidencias experimentales son prácticamente nulas a excepción de un solo estudio (McGraw et al., 2002). Los datos obtenidos con *P. caerulea* apoyan la visión de que, efectivamente, la coloración estructural es entorno dependiente, particularmente en relación a la dieta y cumple el requisito de que potencialmente podrían ser un señal de condición nutricional ya que la producción del plumaje estructural se revela como costoso, cumpliendo así un requisito necesario para la honestidad de las señales. De

esta manera, la relación existente entre condición física y la intensidad de la coloración de plumaje así puede tener consecuencias desde el punto evolutivo y funcional. Estudios previos han sugerido que en *P.caerulea* la coloración del plumaje podría servir como una señal de estatus pero no como señal sexual para la elección de pareja (Ballentine and Hill, 2003). Según los resultados obtenidos en este estudio, la coloración exhibida por los machos de esta especie podría estar indicando la condición física en el momento de la muda. La muda es un proceso que requiere mucha energía ya que se ha de renovarse todo el plumaje que representa aproximadamente el 30% del peso del animal. Evidentemente aquello individuos que tengan un mayor acceso a fuentes de proteínas podrán desarrollar una coloración mas llamativa. Así, los individuos dominantes podrán tener un acceso mayor a estas fuentes de proteína. De esta manera los individuos podrían estar indicando una mejor condición física y por lo tanto una mejor aptitud para la lucha (Senar, 2006).

Otro aspecto que se ha de tener en cuenta respecto a los resultados obtenidos es el interés aplicado de la coloración estructural como indicador de salud de las poblaciones de aves. Es lógico pensar que si el plumaje denota la calidad de un individuo y está influenciado por el ambiente, éste sea utilizado como indicador de ése último, como de hecho han demostrado ya diversos trabajos (Hill, 2006b). Ya que diversos experimentos correlacionales sugieren que las coloraciones estructurales son entorno-dependientes el uso de la coloración del plumaje como indicador ambiental puede enfocarse desde dos perspectivas. Por un lado podrían detectarse diferencias de condición física para diferentes poblaciones de una especie en concreto, determinando la idoneidad de un área determinada para esa especie (Uso de la coloración del plumajes como indicador de condición física de una especie). Este podría ser el caso del *P. caerulaea* y *A. beryllina* ya que nuestros resultados demostraron que aquellos individuos que tenían una mejor condición física desarrollaron un mejor plumaje. Esto es particularmente relevante si la especie de estudio tiene un interés productivo, es especie plaga o tiene problemas de conservación, aspecto último de gran interés para la fauna Mexicana. Por otra parte, se podría encontrar una especie indicadora de calidad ambiental de un área ya

que zonas ambientalmente degradadas por la contaminación o intervención humana afectarían a los recursos alimenticios de esa especie (p.ej. insectos), lo que necesariamente se reflejaría en el color del plumaje (Uso de la coloración de la coloración del plumaje como indicador indirecto de la calidad e un hábitat). Tanto el *P. caerulea* como *A. beryllina* podrían utilizarse como especies indicadoras a través del análisis de su plumaje. Sin embargo un posible sesgo que debe ser estudiado con más profundidad es que, si como se ha sugerido previamente, la coloración estructural de *P. caerulea* puede ser una señal de dominancia (Ballentine and Hill, 2003), una explicación alternativa a los resultados obtenidos podría ser que aquellos individuos subordinados podría distribuirse en las zonas menos favorables (por ej. Zonas suburbanas como el Cieco) y los individuos más dominantes podrían ocupar las zonas con mejores recursos (zonas conservadas como Chiquimitío). Sin embargo para ello, se tendría que asumir que existe una dinámica de fuente sumidero y que las dos poblaciones estuvieran comunicadas. En este sentido, no se encontró que individuos de *P. caerulea* o de otras especies anilladas se recapturaran entre estas de zonas de estudio por lo que se puede asumir que estas zonas estuvieran conectadas (Ch-Zichinelli & Quesada, datos no publicados).

Las ventajas de utilizar la coloración del plumaje como un indicador de condición física o calidad ambiental son múltiples. Es un método sencillo que solo requiere medir la intensidad de la coloración del animal en el campo (utilizando aparatos de color foto digital, colorímetros o espectrómetros), o bien colectar unas pocas plumas del ave y almacenarlas para ser medidas en laboratorio (Senar, 2004). Ambos métodos son validos entre sí puesto que son repetibles y correlacionables (Quesada and Senar, 2006).

Una vez demostrado y establecido como se puede utilizar la coloración del plumaje como indicador biológico, esta metodología se podría utilizar en países donde existiera una amplia red de anilladores de aves, con cuya colaboración se podría establecer un proyecto en el que se utilizaría el plumaje de las aves

como elemento de diagnóstico para determinar la salud de sus poblaciones o, según la especie, de sus hábitats de una forma cómoda y barata. Sin embargo, el escaso tamaño muestral de este estudio indicar que es necesario un mayor esfuerzo de muestreo para poder constatar estas posibilidades.

CONCLUSIONES

- Los componentes de la dieta, en particular las proteínas, afectan el desarrollo de las coloraciones de origen estructural.
- Las coloraciones estructurales tienen una aplicabilidad de como indicadoras de la condición física de distintos individuos dentro de una población experimental.
- Las coloraciones estructurales tienen una aplicabilidad de como indicadoras de la calidad física de poblaciones de aves asociadas a hábitats con diferentes niveles de conservación/degradación.

Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado gracias a la labor desinteresada de todo el personal del Laboratorio del Ecología Funcional del Centro de Estudios en Ecosistemas de la UNAM, en especial a gracias a Carlos A. Chávez –Zichinelli, Ian Mcgregor y a Lorena Morales. Un agradecimiento particular para mi coordinador Jorge E. Schondube por su constate apoyo y amistad. El material e infraestructura del proyecto ha estado financiado por el Megaproyecto UNAM – Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano de la UNAM. Este trabajo de investigación fue realizado con una beca de la Secretaría de Relaciones Exteriores otorgada por el Gobierno de México y una beca para estancia de investigación en el extranjero de l' Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca de Generalitat de Catalunya.

REFERENCIAS

Alonso-Alvarez C, Doutrelant C, Sorci G, 2004. Ultraviolet reflectance affects male-male interactions in the blue tit (*Parus caeruleus ultramarinus*). Behav Ecol 15:805-809.

Amundsen T, Pärn H, 2006. Female Coloration: Review of Functional and Nonfunctional Hypotheses. In: Bird Coloration. Volume 2 Function and Evolution (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambridge: Harvard University Press; 280-346.

Andersson M, 1994. Sexual selection. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Ballentine B, Hill GE, 2003. Female mate choice in relation to structural plumage coloration in Blue Grosbeaks. Condor 105:593-598.

Bennett ATD, Cuthill IC, Partridge JC, Lunau K, 1997. Ultraviolet plumage colors predict mate preferences in starlings. Proc Natl Acad Sci USA 94:8618-8621.

Bortolotti GR, 2006. Natural Selection and Coloration: Protection, Concealment, Advertisement, or Deception? In: Bird Coloration. Volume 1 Mechanisms of Production (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambridge: Harvard University Press; 3-35.

Brush AH, 1978. Avian pigmentation. In: Chemical zoology, vol. X, Aves (Brush A.H., ed). New York: Academic Press; 141-161.

Butcher GS, Rohwer SA, 1989. The evolution of conspicuous and distinctive coloration for communication in birds. Current Ornithology 6:51-108.

Collias EC, Collias NE, Jacobs CH, McAlary F, Fujimoto JT, 1979. Experimental evidence for facilitation of pair formation by bright color in weaverbirds. Condor 81:91-93.

Cuthill IC, Partridge JC, Bennett ATD, 1999. UV vision and its functions in birds. In: Proc. 22 Int. Ornithol. Congr. (Adams N., Slotow R., eds). Johannesburgh: BirdLife South Africa;

Darwin C, 1871. The descent of man and selection in relation to sex. London: John Murray.

Doucet SM, Montgomerie R, 2003. Multiple sexual ornaments in satin bowerbirds: ultraviolet plumage and bowers signal different aspects of male quality. Behav Ecol 14:503-509.

Espmark YO, Amundsen T, Rosenqvist G, 2000. Animal signals. Signalling and signal design in animal communication. Trondheim (Norway): Tapir Academic Press.

Fox DL, 1976. Animal biochromes and structural colours. Berkeley, CA: University of California Press.

Griffith SC, Pryke SR, 2006. Benefits to Females of Assessing Color Displays. In: Bird Coloration. Volume 2 Function and Evolution (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambridge: Harvard University Press; 331-398.

Grubb TC, 1989. Ptilochronology: feather growth bars as indicators of nutritional status. Auk 106:314-320.

Grubb TC, 1995. Ptilochronology. A review and prospectus. Current Ornithology 12:89-114.

Haskell DG, 1996. Do bright colors at nests incur a cost due to predation? Evolutionary Ecology 10:285-288.

Hill GE, 1995. Ornamental traits as indicators of environmental health. BioScience 45:25-31.

Hill GE, 1999a. Is There an Immunological Cost to Carotenoid-Based Ornamental Coloration? Am Nat 154:589-595.

Hill GE, 1999b. Mate choice, male quality, and carotenoid-based plumage coloration. In: Proc. 22 Int. Ornithol. Congr., Durban (Adams N., Slotow R., eds). Johannesburg: BirdLife South Africa; 1654-1668.

Hill GE, 2002. A red Bird in a Brown Bag. Oxford: Oxford University Press.

Hill GE, 2006a. Environmental Regulation of Ornamental Coloration. In: Bird Coloration, Volume 1, Mechanisms and Measurements (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambrigde, MA: Harvard University Press;

Hill GE, 2006b. Female mate choice for ornamental coloration in birds. In: Bird Coloration, Volume 2, Function and Evolution (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambrigde, MA: Harvard University Press;

Hill GE, Doucet SM, Buchholz R, 2005. The effect of coccidial infection on iridescent plumage coloration in wild turkeys. Anim Behav 69:387-394.

Hill GE, Inouye CY, Montgomerie R, 2002. Dietary carotenoids predict plumage coloration in wild house finches. Proc R Soc Lond B 271:1033-1038.

Hill GE, McGraw KJ, 2006. Bird Coloration: volume 1. Mechanisms and Measurements. Cambridge: Harvard University Press.

Howell, S.N.G., & S. Webb. 1995. A guide to the birds of Mexico and Northern Central America. Oxford: Oxford University Press.

Hunt S, Cuthill IC, Bennett ATD, Griffiths R, 1999. Preferences for ultraviolet partners in the blue tit. Anim Behav 58:809-815.

Johnsen A, Delhey K, Kempenaers B, Anderson S, 2003. Plumage colour in nestling blue tits: sexual dichromatism, condition dependence and genetic effects. Proc R Soc Lond B 270:1263-1270.

Johnstone RA, Norris KJ, 1993. Badges of status and the cost of aggression. Behav Ecol Sociobiol 32:127-134.

Keyser AJ, Hill GE, 2000. Structurally based plumage coloration is an honest signal of quality in male blue grosbeaks. Behav Ecol 10:202-209.

Lifjeld JT, Slagsvold T, 1988. Female pied flycatchers Ficedula hypoleuca choose male characteristics in homogeneous habitats. Behav Ecol Sociobiol 22:27-36.

McGraw KJ, Mackillop EA, Dale J, Hauber ME, 2002. Different colors reveal different information: how nutritional stress affects the expression of melanin- and structurally based ornamental plumage. J Exp Biol 205:3747-3755.

Møller AP, 1989. Natural and sexual selection on a plumage signal of status and on morphology in house sparrows, *Passer domesticus*. J Evol Biol 2:125-140.

Olson VA, Owens IPF, 1998. Costly sexual signals: are carotenoids rare, risky or required? Trend Ecol Evol 13:510-514.

Partali V, Liaaen-Jensen S, Slagsvold T, Lifjeld JT, 1987. Carotenoids in food chain studies -II. The food chain of *Parus* spp. monitored by carotenoid analysis. Comp Biochem Physiol 87B:885-888.

Pehrsson O, 1987. Effects of body condition on molting in Mallards. Condor 89:329-339.

Poston JP, Hasselquist D, Stewart IRK, Westneat DF, 2005. Dietary amino acids influence plumage traits and immune responses of male house sparrows, *Passer domesticus*, but not as expected. Anim Behav 70:1171-1181.

Promislow DEL, Montgomerie RD, Martin TE, 1992. Mortality costs of sexual dimorphism in birds. Proc R Soc Lond B 250:143-150.

Prum RO, 1999. The anatomy and physics of avian structural colours . In: Proc. 22 Int. Ornithol. Congr., Durban (Adams N., Slotow R., eds). Johannesburg: BirdLife South Africa; 1633-1653.

Prum RO, 2006. Anatomy, physics, and evolution of structural colors. In: Bird Coloration: volume 1. Mechanisms and Measurements (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambridge: Harvard University Press; 295-353.

Quesada J, Senar JC, 2006. Comparing plumage colour measurements obtained directly from live birds and from collected feathers: the case of the great tit. J Avian Biol 37:609-616.

Rohwer SA, 1975. The social significance of avian winter plumage variability. Evolution 29:593-610.

Rohwer SA, 1977. Status signaling in Harris sparrows : some experiments in deception. Behaviour 61:107-129.

Rohwer SA, Rohwer FC, 1978. Status signalling in Harris sparrows : experimental deceptions achieved. Anim Behav 26:1012-1022.

Roskaft E, Järvi T, 1983. Male plumage colour and mate choice of female Pied Flycatchers *Ficedula hypoleuca*. Ibis 125:396-400.

Roulin A, Dijkstra C, 2003. Genetic and environmental components of variation in eumelanin and phaeomelanin sex-traits in the barn owl. Heredity 90:359-364.

Savalli UM, 1995. The evolution of bird coloration and plumage elaboration. A review of hypotheses. Current Ornithology 12:141-190.

Senar JC, 1999. Plumage coloration as a signal of social status. In: Proc. 22 Int. Ornithol. Congr., Durban (Adams N., Slotow R., eds). Johannesburg: BirdLife South Africa; 1669-1686.

Senar JC, 2004. Mucho más que plumas. Barcelona: Monografies del Museu de Ciències Naturals, vol. 2.

Senar JC, 2006. Color Displays as Intrasexual Signals of Aggression and Dominance. In: Bird Coloration, Volume 2: function and evolution (Hill G.E., McGraw K.J., eds). Cambridge, MA.: Harvard University Press;

Siefferman L, Hill GE, 2005. UV-blue structural coloration and competition for nestboxes in male eastern bluebirds. Anim Behav 69:67-72.

Slagsvold T, Lifjeld JT, 1985. Variation in plumage colour of the Great Tit Parus major in relation to habitat, season and food. J Zool , Lond 206:321-328.

Veiga JP, 1995. Honest signalling and the survival cost of badges in the House Sparrow. Evolution 49:570-572.

Zahavi A, 1975. Mate selection - a selection for a handicap. J theor Biol 53:205-214.

Anexo 1

Figura 1. Zona de estudio de Cieco (Foto: J Quesada)

Figura 2. Zona de estudio de Chiquimitío (Foto: J Quesada)

Figura 3. Pico gordo azul *Passerina caerulea* (Foto: K. Renton)

Figura 4. Colibrí berilo Amazillia beryllina (Foto: J Quesada)

Figura 5. Construcción del animalario usado para mantener los animales en cautividad (Foto: J Quesada)

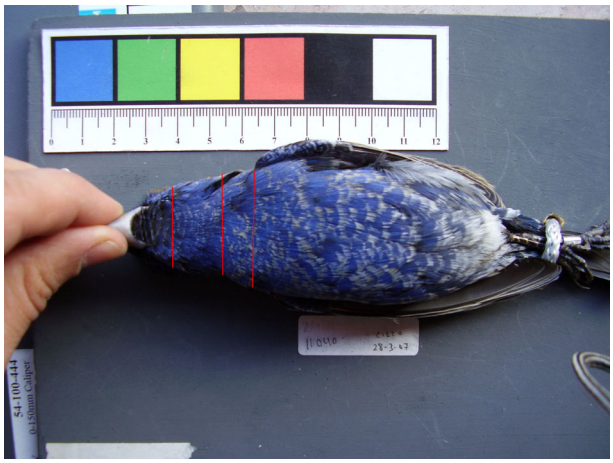

Figura 6. Medición de Coloración de plumaje (Foto: J. Quesada)