
Ciencia, Tecnología y Salud

Revista Centroamericana de Investigación y Postgrado
Universidad de San Carlos de Guatemala

ISSN: 2409-3459 (impreso) / 2410-6356 (electrónico)

Volumen 11 Número 2 julio / diciembre 2024

Bosques Montanos Mesoamericanos: Conservación y Estudio del Hábitat del Quetzal

Artículos científicos

Artículos de revisión

Conferencia de congreso

Ensayos científicos

Resúmenes de congresos

Reporte de casos

Reseñas



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



DGI Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala



Consejo Nacional
de Áreas Protegidas



Ciencia, Tecnología y Salud es una publicación de la Dirección General de Investigación (DIGI), con la colaboración de la Coordinadora General del Sistema de Estudios de Postgrado (CG-SEP), de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT). Está orientada a divulgar investigaciones originales en las áreas de ciencias, tecnologías y salud humana y animal. Constituye una publicación en formato digital Open Journal System (OJS) en línea, y semestral en forma impresa. Los manuscritos aceptados para publicación son sometidos a procesos de arbitraje por revisores externos, lo que garantiza al lector y autores un alto nivel y rigor académico. Aprobada en el punto Séptimo, Inciso 7.1 del Acta No. 20-2014 de la sesión ordinaria celebrada por el Consejo Superior Universitario, el día miércoles 12 de noviembre de 2014.

Nombre: Dirección General de Investigación, editor | Rodas Morán, Andrea Eunice, editora ejecutiva
Título: Ciencia, Tecnología y Salud / Revista de Investigación y Postgrado; editor Dirección General de Investigación; editora ejecutiva Andrea Eunice Rodas Morán.
Descripción: Guatemala : Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, Unidad de Publicaciones y Divulgación, 2024 | Volumen 11, número 2. (julio/diciembre 2024).
Identificadores: ISSN impreso 2409-3459 | ISSN electrónico 2410-6356
Temas: LEMB: Alimentación. | Agronomía. | Biología. | Conservación de los recursos naturales.
| Física. | Industrias. | Matemática. | Medicina. | Medio ambiente natural. | Recursos naturales. | Salud pública. | Química.
Clasificación: CDD 500 C569
Disponible en <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes>

Universidad de San Carlos de Guatemala

Walter Ramiro Mazariegos Biolis

Rector

Luis Fernando Cordón Lucero

Secretario General

Alice Burgos Paniagua

Directora General de Investigación, DIGI

Julio R. Salazar Pérez

Coordinador General de Programas, DIGI

Carlos René Sierra

Coordinador General, SEP

La correspondencia debe ser dirigida a:

Edificio S-11, 3^{er} Nivel, Ciudad Universitaria, Zona 12

Teléfono: 2418 7950

Correo: cts@digி.usac.edu.gt



Fotografía de portada: María José Lou.

Descripción de la fotografía de portada: Un quetzal macho descansa plácidamente en una rama adornada con musgos y epífitas. Después de alimentarse con frutos del bosque, toma un breve respiro para disfrutar del sol y digerir su alimento. Una escena tranquila en su hábitat reproductivo, el bosque nuboso, San Rafael Pie de la Cuesta, San Marcos.

La reproducción total o parcial del contenido e imágenes de esta publicación se rige de acuerdo a normas internacionales sobre protección a los derechos de autor, con criterios especificados en la licencia Creative Commons (CC BY-NC-SA 4.0)

©Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2026.
Los textos publicados en este documento son responsabilidad exclusiva de sus autores.

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 (impreso) / 2410-6356 (electrónico)

Vol. 11 Num. 2 jul/dic 2024

Directorio / Board-Staff

Leonardo J. Mendoza-Blanco

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (Unan-León),
Nicaragua

Enrique Pazos

Escuela de Física y Matemáticas, Usac, Guatemala

Francisco Romero-Royo

Universidad Tecnológica Nacional, Costa Rica

Igor I. Slowing-Umaña

Iowa State University, United States of America

Liseth Perez

Technische Universität Braunschweig, Alemania

Rafael Fernandez-Botran

Associate Professor of Pathology & Laboratory Medicine,
Estados Unidos

Benjamin A. Rosales Rivera

Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua

Rodrigo J. Gonzalez

Blavatnik Institute, Harvard Medical School,
Estados Unidos

Stewart Oakley

Civil Engineering Department, California State University,
Estados Unidos

Cecilio Alvarez Toledano

Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de
México, México

Unidad de Publicaciones y Divulgación

Marlene P. Pérez Muñoz

Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Rosa del C. Cotom Nimatuj

Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Asesores de edición

Dara S. Higueros Pellecer

Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

José D. Marroquín

Dirección General de Investigación, Usac, Guatemala

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 (impreso) / 2410-6356 (electrónico)

Vol. 11 Num. 2 jul/dic 2024

Contenido / Contents

Editorial / Editorial 70

Artículo Científico / Scientific Article

Use of Telemetry for Tracking Two Individuals of Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) in the Mountains of Baja Verapaz, Guatemala

*Uso de telemetría para el seguimiento de dos individuos de Quetzal Resplandeciente (*Pharomachrus mocinno*) en las montañas de Baja Verapaz, Guatemala*

Michelle Bustamante-Castillo, Bianca Bosarreyes, Manuel A. Barrios-Izás 71

Fenotipo de inestabilidad de microsatélites en Carcinoma colorrectal mediante la expresión de proteínas reparadoras del ADN

Microsatellite instability phenotype in colorectal carcinoma through the ADN mismatch repair proteins expression

Orlando Rodas-Pernillo, Edith Oregón, Oscar Cobar, Abbas Chakhtoura, J., Hugo Cardona, Federico Nave, Elisa Hernández 82

Propagación de dos helechos arborescentes (*Cyatheaceae*) del bosque nuboso guatemalteco por medio de tres metodologías diferentes

*Propagation of two tree ferns (*Cyatheaceae*) from the Guatemalan cloud forest by three different techniques*

Andrea M. Cabarrús 90

Ensayo Científico / Scientific Essay

La Región Central de Guatemala, un Área Olvidada en el Estudio y Conservación del Quetzal (*Pharomachrus mocinno*)

*The Central Region of Guatemala, a Forgotten Area in the Study and Conservation of the Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*)*

E. Daniel Tenez, A. Lucía Grajeda, Claudia L. Burgos 100

Océanos de oportunidades: Áreas Marinas Protegidas y su potencial en regiones económicamente vulnerables

Oceans of opportunity: Marine Protected Areas and their potential in economically vulnerable regions

Jenniffer Alejandrina García Dardón 112

Instrucciones para autores

Instructions for authors 120

Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2409-3459 (impreso) / 2410-6356 (electrónico)

Vol. 11 Num. 2 jul/dic 2024

Editorial / Editorial

En este primer número del volumen 11 de *Ciencia, Tecnología y Salud*, presentamos una selección de trabajos que aunque breve, refleja el compromiso continuo de la revista con la publicación de investigaciones de alta calidad, destacando el incremento reciente en el índice de rechazo de manuscritos.

Este número está compuesto por tres artículos, un ensayo y una reseña. El primer artículo, titulado “Síntesis y caracterización de dos materiales azo: Comparación entre un compuesto sulfonado y su análogo no sulfonado”, explora la creación y análisis de materiales innovadores mediante técnicas avanzadas de caracterización, como FTIR-ATR y XRD. Los hallazgos destacan las diferencias en absorción de agua y estabilidad térmica, proporcionando nuevas perspectivas en la ciencia de materiales.

El segundo artículo, “Análisis comparativo de tecnologías sustitutivas para la medición del potencial eólico en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur”, se evalúan tres tecnologías distintas para medir la velocidad y dirección del viento. El estudio demuestra la confiabilidad del sistema por mástil en mediciones a largo plazo, en comparación con tecnologías emergentes como drones y globos de helio, subrayando la importancia de la continuidad y precisión en los datos para proyectos de energía renovable.

El tercer artículo, “Optimización de la biosíntesis de polihidroxialcanoatos por bacterias nativas de

Guatemala utilizando suero lácteo como sustrato”, aborda el potencial biotecnológico de bacterias nativas para la producción de biopolímeros biodegradables. Este trabajo destaca la viabilidad de utilizar residuos de la industria láctea como sustrato, lo que no solo mejora la sostenibilidad del proceso, sino que también reduce significativamente los costos de producción de estos polímeros, abriendo nuevas oportunidades para la sustitución de plásticos convencionales.

El ensayo, titulado “Desarrollo de un prototipo para la vinculación de los actores del ecosistema de innovación universitario”, aborda el diseño y desarrollo de aplicaciones móviles que fortalecen la interacción entre investigadores, emprendedores, empresarios e inversionistas. El ensayo propone una serie de herramientas innovadoras que buscan dinamizar los ecosistemas universitarios de innovación, fomentando una comunicación efectiva y potenciando la transferencia de conocimiento.

Finalmente, cerramos este número con la reseña “Plantas con semillas introducidas en Guatemala”, que proporciona una reflexión crítica sobre un capítulo de la serie *Biodiversidad de Guatemala*, subrayando los desafíos y oportunidades para el estudio de especies exóticas en el país.

Este número reafirma el compromiso de *Ciencia, Tecnología y Salud* con la difusión de investigaciones innovadoras que buscan soluciones sostenibles y colaborativas para los desafíos del presente.

Use of Telemetry for Tracking Two Individuals of Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno mocinno*) in the Mountains of Baja Verapaz, Guatemala

Uso de telemetría para el seguimiento de dos individuos de Quetzal Resplandeciente (Pharomachrus mocinno mocinno) en las montañas de Baja Verapaz, Guatemala

Michelle Bustamante-Castillo *, Bianca Bosarreyes , Manuel A. Barrios-Izás 

Instituto de Investigaciones, Centro Universitario de Zacapa (Cunzac),
Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

*Autor al que se dirige la correspondencia: michelle.amazilia.bustamante@gmail.com

Recibido: 11 de noviembre 2024 / Revisión: 25 de noviembre 2024 / Aceptado: 20 de diciembre 2024

Abstract

Telemetry tracking provides essential insights into avian movements and habitat preferences, aiding the identification of critical resources and conservation areas for endangered species such as the Resplendent Quetzal. In this study, we tracked two radio-tagged Resplendent Quetzals in a mountainous cloud forest region containing national protected areas, private reserves, and indigenous lands. Both individuals primarily remained within the protected Biotopo del Quetzal reserve and nearby areas for approximately five months; however, during the non-breeding season, one individual exhibited increased mobility, moving outside the reserve for three months and utilizing lower-elevation areas up to 5.5 km away. These areas are embedded in a modified landscape, comprising agricultural fields, roads, and human settlements. Together with previous telemetry data from Central America's Resplendent Quetzal populations, these findings support the occurrence of seasonal migratory behavior in this species, indicating reliance on distinct habitats at different times of the year. Establishing biological corridors could provide safe passage between these habitats, facilitating access to vital foraging and roosting sites while mitigating genetic isolation effects through enhanced connectivity and genetic resilience. Key non-protected sites within the study area, such as Ranchitos del Quetzal and forest patches along the Panimá River basin, offer valuable opportunities for targeted conservation aimed at improving habitat connectivity, safeguarding critical resources, and engaging local communities. Finally, preserving and restoring plant species identified as primary food sources should be prioritized in protected and adjacent areas to ensure adequate nutrition for Resplendent Quetzals throughout their migratory and breeding cycles.

Keywords: Avian migration, habitat connectivity, conservation biology, cloud forest, ecological corridors

Resumen

El seguimiento por telemetría proporciona información esencial sobre los movimientos y las preferencias de hábitat de las aves, lo que facilita la identificación de recursos críticos y áreas de conservación para especies en peligro, como el Quetzal Resplandeciente. En este estudio, rastreamos dos Quetzales Resplandecientes con radiotransmisores en una región montañosa de bosque nuboso que incluye áreas protegidas nacionales, reservas privadas y tierras indígenas. Ambos individuos permanecieron principalmente dentro del bosque nuboso protegido del Biotopo del Quetzal y en áreas cercanas durante aproximadamente cinco meses; sin embargo, durante la temporada no reproductiva, uno de ellos mostró un aumento en su movilidad, desplazándose fuera de la reserva durante tres meses y utilizando áreas de menor elevación, a una distancia de hasta 5.5 km. Estas áreas se encuentran en un paisaje modificado que incluye campos agrícolas, carreteras y asentamientos humanos. Junto con datos previos de telemetría de poblaciones de Quetzales Resplandecientes en Centroamérica, estos hallazgos apoyan la ocurrencia de un comportamiento migratorio estacional en esta especie, lo cual indica una dependencia de hábitats distintos en diferentes épocas del año. El establecimiento de corredores biológicos podría proporcionar un paso seguro entre estos hábitats, facilitando el acceso a sitios de alimentación y descanso vitales, al tiempo que mitiga los efectos de aislamiento genético mediante una mayor conectividad y resiliencia genética. Sitios clave no protegidos dentro del área de estudio, como Ranchitos del Quetzal y parches de bosque a lo largo de la cuenca del río Panimá, ofrecen valiosas oportunidades para la conservación dirigida, con el objetivo de mejorar la conectividad del hábitat, salvaguardar recursos críticos e involucrar a las comunidades locales. Finalmente, la preservación y restauración de especies de plantas identificadas como fuentes alimenticias primarias deben priorizarse en áreas protegidas y adyacentes para asegurar una nutrición adecuada para los Quetzales Resplandecientes a lo largo de sus ciclos migratorios y reproductivos.

Palabras clave: Migración aviar, conectividad del hábitat, biología de la conservación, bosque nuboso, corredores ecológicos



Introduction

The Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno mocinno*) is a flagship species of cloud forest ecosystems, which are among the most biodiverse yet severely threatened habitats in Mesoamerica. The conservation of this species is closely tied to the preservation of its habitat, which also benefits numerous other species that coexist in these environments (Şekercioğlu et al., 2007). Despite its iconic status, the Resplendent Quetzal faces significant threats across its range, largely driven by the increasing conversion of cloud forests into agricultural land due to population expansion (Schulz & Eisermann, 2017). This habitat loss and fragmentation not only depletes essential resources but also isolates Resplendent Quetzal populations, impeding genetic exchange and amplifying their risk of extinction (Benscoter et al., 2013).

In addition to these external threats, Resplendent Quetzal's own ecological characteristics further exacerbate its vulnerability. The species relies on a specialized diet that includes fruits, insects, and snails, particularly important during the breeding season (Carleton & Smith, 2016; Wheelwright, 1983). The availability of fruiting plants, especially those from the Lauraceae family, is critical for the species' reproductive success and influences its migratory behavior (Solórzano et al., 2000). Furthermore, the Resplendent Quetzal exhibits complex altitudinal migration patterns (Powell & Bjork, 1994), which appear to be influenced, in part, by seasonal fluctuations and food availability by seasonal fluctuations and food availability (Solórzano et al., 2000; Wheelwright, 1983). These traits underscore the species' sensitivity to habitat changes, making it especially vulnerable to the disruptions caused by habitat fragmentation.

To address the conservation challenges faced by endangered species like the Resplendent Quetzal, understanding their movement patterns and habitat use at important areas of its distribution is essential. Telemetry tracking provides a powerful tool in this regard, offering real-time data on bird movements and critical insights into various ecological and environmental needs. For instance, telemetry facilitates the analysis of habitat selection, helping prioritize areas for protection and restoration to ensure that vital resources are available year-round (Martin et al., 2009). Moreover, telemetry offers valuable information on feeding behavior by identifying key foraging

sites, important food items, and seasonal fluctuations in food availability. This data is crucial for tailoring conservation efforts to meet the dietary requirements of species, especially in habitats affected by human disturbances and the changing climate (Bolaños-Sittler et al., 2019), ensuring habitat management aligns with species-specific needs.

Furthermore, by assessing how birds move between fragmented habitats, telemetry can inform conservation strategies aimed at maintaining genetic diversity. The work of Gillies et al. (2011) emphasizes the importance of understanding movement patterns to evaluate the connectivity of populations, which is essential for preserving genetic diversity and reducing the risks of inbreeding. This is particularly relevant for species that may face genetic isolation due to habitat fragmentation (Gillies et al., 2011). This is particularly crucial for species that rely on specific habitats for breeding, migration, or foraging, as specialist species are more susceptible to the impacts of forest fragmentation compared to generalist species, posing a significant threat to their survival (Khimoun et al., 2016).

The aim of this survey was to describe the movement and habitat use of radio-tagged Resplendent Quetzals tracked via telemetry in the mountain region of Baja Verapaz, a key conservation area for the species in Guatemala.

In Guatemala, where information on *P. mocinno* is limited (Bolaños-Sittler et al., 2019), this study provides essential data to inform conservation strategies, such as establishing protected areas, restoring habitats, and implementing community-based initiatives. Integrating this knowledge into broader efforts will better support the preservation of the species and its critical cloud forest habitats.

Materials and Methods

Study area

The study was conducted in a mountainous region of the department of Baja Verapaz, in northern Guatemala. The primary study site was the Biotopo del Quetzal, a protected area managed by the University of San Carlos of Guatemala (Figure 1). However, the research also included surrounding areas that are part of the Cloud Forest Biological Corridor, which encompasses several national protected areas, private

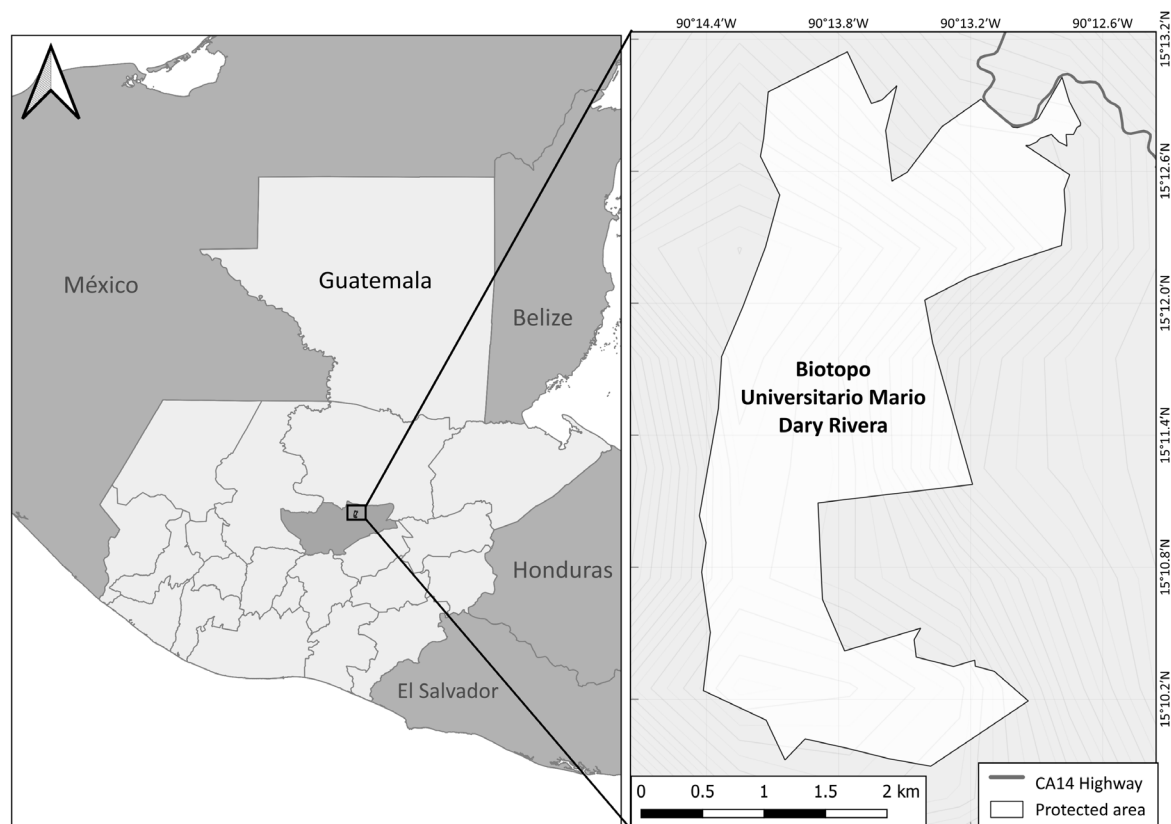
nature reserves, and indigenous communities. The Resplendent Quetzals tracked with telemetry were captured within the Biotopo del Quetzal.

The Biotopo del Quetzal is characterized predominantly by very humid lower montane tropical forest (bmh-MBT), with a smaller portion of humid pre-montane tropical forest (bh-MBT) (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad, Universidad Rafael Landívar [IARLA-URL], 2018). The area experiences an average temperature of 18 °C, a relative humidity

of 93.9%, and an average annual rainfall of 2,092 mm (Centro de Estudios Conservacionistas, 1999). The landscape surrounding the Biotopo del Quetzal includes several private protected areas and patches of cloud and mountain forest, either as part of restaurants, hotels, or farms with various land uses. Notable locations include Hotel Posada Montaña del Quetzal, Cerro Verde, Hotel y Restaurant Ranchitos del Quetzal, and Biotopín, all of which are classified as very humid pre-montane tropical forest (bmh-PMT).

Figure 1

Map of the study area showing the location of the Biotopo del Quetzal protected area in Baja Verapaz, Guatemala



Capture Methods and Telemetry Deployment for Resplendent Quetzals

We captured Resplendent Quetzals within the touristic sector of the Biotopo del Quetzal using a combination of five vertical mist nets (12 m long, 12

shelves, 38 mm mesh) and five horizontal mist nets (12 m long, 38 mm mesh). The nets were strategically placed in front of previously identified feeding trees, including Aguacatillo (*Persea donnell-smithii* Mez), Guarumo (*Cecropia peltata* L.), and Ciprecillo (*Podocarpus oleifolius* D. Don). Capture efforts took

place over 16 sampling periods, each lasting five days, from February to July 2011 and October 2011 to April 2012.

Captured individuals were fitted with Telenax radio transmitters (TXN-008B model), which weighed less than 4% of the average Resplendent Quetzal body mass (185-388 g) (Dayer, 2020; Solórzano & Oyama 2010). The transmitters had a battery life of seven months and a coverage range of up to 20 km in a straight line without obstacles.

Radio transmitters were secured to the birds using a nylon harness fitted on their back. Movements of the tagged individuals were monitored using a portable receiver (Telenax RX-TLNX) and a handheld antenna.

Monitoring and Tracking Radio-Tagged Resplendent Quetzals

The tracking was conducted for 15 days each month during the sampling period from July 2010 to June 2011. The daily monitoring was done regularly from 5:00 a.m. to 5:30 p.m. Bird locations were plotted on a digital map with forest cover and reserve boundaries using ArcGIS software. Additionally, behavioral observations were recorded, including feeding, resting, grooming, flying, movement, and sleeping behaviors. The identification of Resplendent Quetzal food plants was carried out by collecting botanical samples, which were pressed and identified with the help of expert botanists. These specimens were deposited in the USCG herbarium at the University of San Carlos of Guatemala. However, due to the common nature of some species and the herbarium's capacity limitations, not all specimens were formally archived. We also recorded the fruits and other food items consumed by the Resplendent Quetzal at the study site, categorizing their frequency of consumption as follows: Common (more than 10 observations per month), Moderately common (1 to 10 observations per month), and Rare (1 to 3 times per month).

Results

Two Resplendent Quetzals were captured for tracking: one male on July 17, 2010, using a vertical mist net set 5 meters high in a Guarumo (*Cecropia peltata* L.) tree, and one female on January 24, 2012, using a horizontal net placed approximately 3 meters high in front of an Aguacatillo (*Persea donnell-smithii*

Mez) tree. Both individuals were trapped near the parking lot of the Biotopo del Quetzal Reserve.

The male weighed 214 grams and displayed no signs of body fat or molting. Its tarsus measured 3.52 cm, and its tail length was 42.5 cm (Figure 2). The female weighed 211 grams and displayed moderate fat reserves in the abdomen and flanks. Her tail measured 18.20 cm, and her tarsus was 3 cm long (Figure 2).

Figure 2

Male Resplendent Quetzal with a radiotransmitter (left and bottom) and female (top right) tracked in Biotopo del Quetzal and the Corredor Biológico del Bosque Nuboso, Baja Verapaz, Guatemala.



During the first four months of tracking (July to October 2010), the male primarily slept and foraged within the touristic area of the Biotopo del Quetzal, moving daily from his overnight roost at 1,959 meters above sea level (masl) to his main feeding site

at 1,600 masl near the reserve's border. He followed a consistent routine. At dawn (approximately 5:00-5:45 a.m.), he would leave his roost in a tall tree and descend gradually to lower-altitude foraging areas, taking around 30 min with pauses. Feeding sessions at his primary site near the reserve boundary lasted about 30 min, during which he obtained fruit either in flight or while perched. After feeding, he typically rested for 45 min to 1 h, perching on the feeding tree or nearby branches, preening, and regurgitating previously consumed fruits.

Inside the Biotopo del Quetzal, the male primarily utilized a roosting site known as Entrada a Quisis (coordinates: 15.20885, -90.22247), situated at an elevation of 1,959 m.a.s.l. He also frequented Rancho de Conclusiones (coordinates: 15.21274, -90.22045) at 1,809 m.a.s.l., where he fed fruits from Guarumo and Guarumo flaco (*C. silvicola*), Ciprecillo, and occasionally butterfly caterpillars. Another feeding site was along the Los Helechos trail (coordinates: 15.21301, -90.21694) at 1,625 m.a.s.l., where he consumed Guarumo, Frutillo (*Cornus disciflora*), and Ciprecillo. Additionally, he foraged along the CA-14 highway at elevations between 1,600 and 1,630 m.a.s.l., including areas at the edge of the Biotopo del Quetzal, where he fed on guarumo, frutillo, *Rhamnus capreifolia*, and *Clusia guatemalensis* Hemsl. Vegetation from the Hotel Ranchitos del Quetzal and Bio-

topin areas provided additional food sources, such as Guarumo, Frutillo, and *Prunus* sp.

During this observation period, several regurgitated fruits were collected, including Aguacatillo (twice), Frutillo (four times), *Syzygium jambos* (once) (a cultivated species found in the tourist areas of both Ranchitos del Quetzal and Biotopin), and *Prunus brachybotrya* (once). Examination of the fruits revealed that the pulp, skin, and flesh were not fully ripe, often showing a slightly green or pale coloration. It is likely that regurgitation occurred because the fruits were under-ripe, as previously noted by Ávila et al. (1996).

While the Resplendent Quetzal male was frequently observed alone, he was seen with a female on seven occasions and with both a female and another male on five occasions. Between 11 a.m. and 2 p.m., the male regularly rested and resumed feeding activities between 3:30 and 4:00 p.m. Typically, in the late afternoon, between 5:00 and 5:30 p.m., the male would begin his ascent to the roosting site after a prolonged resting period from 3:00 to 5:00 p.m.

During the tracking period, the male was recorded feeding on 12 plant species (Table 1). The most frequently consumed fruits were guarumo and frutillo. Additionally, occasional consumption of worms (observed twice) and flying insects (observed three times) was noted.

Table 1

Fruit-bearing plant species consumed by male Resplendent Quetzal tracked at the study site from July 2010 to January 2011. Monthly consumption frequencies categorized as: Common (C) = more than 10 observations, Moderate (M) = 3-10 observations, and Rare (R) = 1-3 observations

N.	Family	Plant specie	Commun local name	Month						
				Jul 2010	Aug 2010	Sep 2010	Oct 2010	Nov 2010	Dec 2010	Jan2011
1	Clusiaceae	<i>Clusia salvinii</i> Donn. Sm.	Oreja de burro	R	R	R				
2	Cornaceae	<i>Cornus disciflora</i> D.C.	Frutito	C	C	C	C	C	C	
3	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp.	Aguacatillo					R		
4	Lauraceae	<i>Persea donnell-smithii</i> Mez	Aguacatillo					R		
5	Myrtaceae	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston				R	M	M		

Tabla 1 (Continuación)

N.	Family	Plant specie	Commun local name	Month						
				Jul 2010	Aug 2010	Sep 2010	Oct 2010	Nov 2010	Dec 2010	Jan2011
6	Podocarpaceae	<i>Podocarpus oleifolius</i> D. Don	Cipresillo	M	M	C	C			
7	Rhamnaceae	<i>Rhamnus capreifolia</i> Schltdl.				M	M	M		
8	Rosaceae	<i>Prunus brachybotrya</i> Zucc.				R	R	R		
9	Rosaceae	<i>Prunus</i> sp.					M	R		
10	Rosaceae	<i>Rubus</i> sp.	moras	R	R	R			R	
11	Urticaceae	<i>Cecropia peltata</i> L.	Guarumo	C	C	C	C			
12	Urticaceae	<i>Cecropia sylvicola</i> Standl. & Steyerl.	Gurarumo flaco		C	C	C			

From November 2010 to February 2011, the male began using sites beyond the Biotopo del Quetzal and nearby areas for sleeping, resting, feeding, and roosting (Figure 2). The first recorded site, on November 10, was 600 meters from the Biotopo in a straight line, at a leatherleaf fern (*Rumohra adiantiformis*) farm with degraded forest cover. At this site, the male was observed feeding twice on *Ocotea* and *Persea* fruits. During a 10-day sampling period, he was recorded on this area five times before the transmitter signal was lost, and he was not relocated until around December 10, 2010.

From December 12 to 20, the male traveled up to 5.5 km from his previous location, reaching elevations of 1,350 to 1,479 meters across bmh-MBT and bh-PMT forest types. Tracking was challenging due to intermittent transmitter signals, which prevented visual confirmation. By December 22, he was detected in a well-preserved forest remnant along the Panimá River basin, near Panimaquito and Sachut. Steep, rocky terrain limited access, and while his transmitter signal was detectable, his position in a ravine made him unreachable, where he remained for about a week.

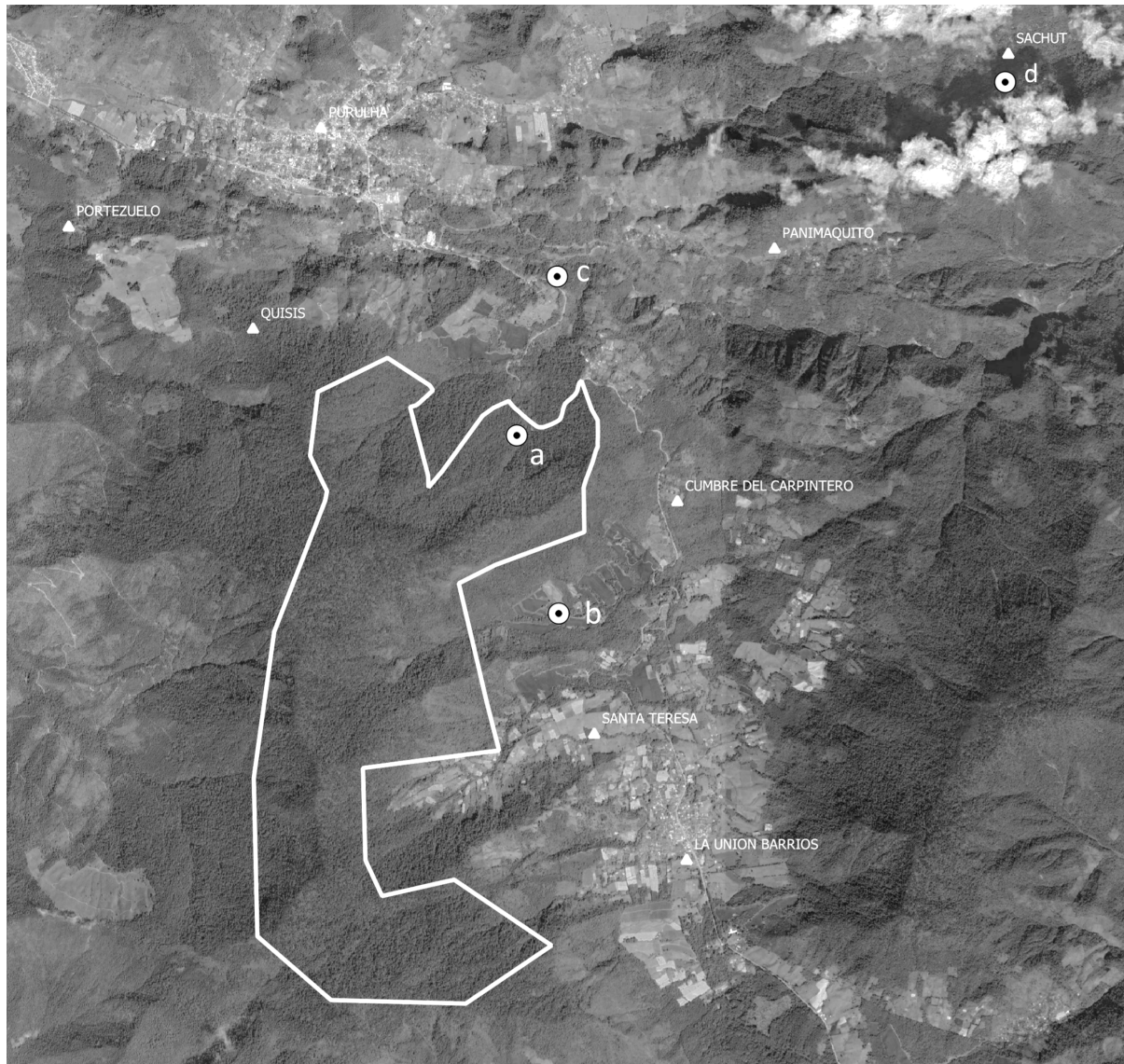
By the end of January 2011, the male returned to the Biotopo del Quetzal and stayed within its boundaries until the radio transmitter's battery was depleted around February 5, 2011.

The radio-tagged female stayed within the Biotopo del Quetzal and neighboring areas, such as Ranchitos del Quetzal and Biotopín, for five months, until her transmitter ceased functioning. These areas are located adjacent to the Biotopo's boundary, causing the bird to travel just a few meters beyond Biotopo's limits to access them.

She roosted at the forest edge near Hotel Ranchitos del Quetzal, starting her day around 5:00 a.m. by moving to fruit-bearing trees near the road in the Biotopo's tourist section. During a 20-day sample period, she was recorded in 12 days. Like the male, she fed actively from 6:00 to 11:00 a.m., with occasional 30-40-minute breaks for grooming, regurgitating, and digesting. From noon to 3:00 p.m., she was less active, perching in one spot or moving minimally. Feeding resumed in a broader area from 3:00 to 4:30 or 5:00 p.m., after which she returned to her roost by 5:30 p.m. During this time, she fed fruits from seven species including aguacatillo (*Persea donnell-smithii*

Figure 3

Sites visited by the radio-tagged Resplendent Quetzal male during the survey. a) borders of the BUCQ reserve (marked in white), b) Leather leaf (*Rumohra adiantiformis*) farm at Santa Teresa Village, c) forest patch along the Panimá river basin and d) Forest surrounding Sachut Village.



near the reserve's border, as well as from Frutillo, *C. disciflora*, and Guarumo (Table 2). The female relied on the Biotopo del Quetzal as her primary habitat but

also ventured into nearby areas for feeding and resting during the breeding season.

Table 2

Fruit-bearing plant species consumed by female Resplendent Quetzal tracked at the study site from January to May 2012 with monthly consumption frequencies categorized as Common (C) = more than 10 observations, Moderate (M) = 3-10 observations, and Rare (R) = 1-3 observations.

N.	Family	Plant specie	Commun local name	Month			
				Jan	Feb	Mar	Apr
1	Cornaceae	<i>Cornus disciflora</i> D.C.	Frutilo			C	C
2	Lauraceae	<i>Persea donnell-smithii</i> Mez	Aguacatillo	C	R		
3	Rhamnaceae	<i>Rhamnus capreifolia</i> Schltldl.				M	M
4	Rosaceae	<i>Prunus brachybotrya</i> Zucc.				R	R
5	Rosaceae	<i>Prunus</i> sp.				R	M
6	Rosaceae	<i>Rubus</i> sp.	Moras		R	R	
7	Urticaceae	<i>Cecropia peltata</i> L.	Guarumo	C	C	C	C

Discussion

Our telemetry data showed that the two tracked Resplendent Quetzals stayed within specific areas of their primary habitat in the Biotopo del Quetzal Cloud Forest for at least five months, following established routines. However, during the non-breeding season, the male exhibited increased mobility, moving to lower altitudes. Similar patterns observed in other telemetry studies (Paiz, 1996; Powell & Bjork, 1994) emphasize the need to conserve both breeding and migratory habitats.

The causes of Resplendent Quetzal's altitudinal migration are partially understood but are closely tied to ecological factors, such as food availability and habitat conditions. These seasonal movements reflect a strategic adaptation to secure vital resources, particularly ripe Lauraceae fruits, which are scarce in breeding areas at certain times of the year (Carleton & Smith, 2016; Solórzano et al., 2000).

Our observations indicate that these birds not only traverse degraded areas but also utilize them for

foraging and resting. This behavior has been observed in other studies, which show that Resplendent Quetzals rely on degraded habitats for essential activities such as foraging and resting (Solórzano et al., 2000, 2004).

However, dependence on these disturbed habitats increases their vulnerability to threats like predation and vehicle collisions, particularly in urbanized areas (Bolaños-Sittler et al., 2019). Addressing these challenges requires habitat restoration and the establishment of ecological corridors to connect fragmented habitats. Corridors enable quetzal movement across elevations, improving access to resources and maintaining genetic diversity (Şekercioğlu et al., 2007). Additionally, these corridors support ecosystem resilience and biodiversity by linking habitat patches and facilitating species adaptation to environmental changes (Clark, 2004; Rogers & Allen, 2011).

In the region, significant progress has been made with the establishment of the Cloud Forest Biological Corridor, which encompasses multiple protected areas, private reserves, and green spaces within

tourist sites. While this initiative is crucial, it must be expanded as habitat degradation continues to threaten the region's ecological integrity. Expanding the corridor and establishing protected areas across high and low elevations remain critical for the Resplendent Quetzal's seasonal migrations and the long-term conservation of its ecological role (Fraser et al., 2010).

Our observations indicate that Resplendent Quetzals not only traverse degraded areas but also utilize them for foraging and resting, as documented in previous studies (Solórzano et al., 2000, 2004). However, reliance on disturbed habitats increases their vulnerability to threats such as predation and vehicle collisions in urbanized landscapes (Bolaños-Sittler et al., 2019). Addressing these challenges requires habitat restoration and the establishment of ecological corridors that connect fragmented habitats, enabling quetzal movement across elevations while maintaining genetic diversity and access to critical resources (Şekercioğlu et al., 2007). These corridors also enhance ecosystem resilience and biodiversity by linking habitat patches (Rogers & Allen, 2011).

In the region, progress has been made with the Cloud Forest Biological Corridor, which includes several protected areas, private reserves, and green spaces in tourist sites. However, the corridor must be expanded to address ongoing habitat degradation. Our data identified several critical areas, including Ranchitos del Quetzal, forest patches in the Panimá River basin, and forests near Sachut and Santa Teresa villages, as key migratory habitats for the Resplendent Quetzal. These sites provide essential resources during the non-reproductive season and function as inter-reproductive habitats that support the quetzal population from the Biotopo del Quetzal Cloud Forest (BUCQ) during the latter part of the year.

Although our survey tracked each Resplendent Quetzal for less than a year, data from both individuals, along with Paiz's (1999) study in the Sierra de las Minas Biosphere Reserve, show that some quetzals from northern Guatemala migrate to lower altitudes during the non-breeding season to forage, roost, and rest. Multiple studies support that this migratory behavior is consistent across populations, further validating the importance of our findings in enhancing the understanding of quetzal movement patterns in different regions.

Although the fieldwork for this study was conducted over a decade ago (2011-2012), its findings remain relevant for several reasons. It provides a

historical baseline for Resplendent Quetzal presence and ecological behavior in the region, essential for understanding long-term trends in habitat use, population dynamics, and distribution patterns. This is particularly important given ongoing environmental changes and deforestation that may have altered site conditions. Additionally, the study adds valuable data to the limited research on Resplendent Quetzal's habitat needs, informing future conservation strategies. Finally, it offers an opportunity to compare historical and recent data, identifying areas for further research and conservation.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Council of Science and Technology (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) and the Government of Guatemala through the National fund for Science and Technology [Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FODECYT 40-2009)] for given financial support for the research. To Lic. Mayra Oliva, director of the protected area Biotopo del Quetzal, for her collaboration and support throughout the study. Without her help, this study would not have been possible.

Contribution of authors

Drafting and revising the manuscript: M.B-C.
Conception and design of the study: M.B-C., M.A.B-I.
Collecting of data: all the authors
Cleaning data, performing the analysis, and/or interpretation of data: M.B-C., M.A.B-I.
Editing the manuscript critically for important intellectual content: all the authors

Supplementary Materials

Data are within the paper.

References

- Ávila, M., Hernandez, V., & Verlarde E. (1996). The diet of resplendent Quetzal (*Pharomachrus Moncinno mocinno*: Trogonidae) in a Mexican cloud forest. *Biotropica*, 28(4b), 720-727. <https://doi.org/10.2307/2389058>

- Benscoter, A. M., Reece, J. S., Noss, R. F., Brandt, L. A., Mazzotti, F. J., & Romañach, S. S. (2013). Threatened and endangered subspecies with vulnerable ecological traits also have high susceptibility to sea level rise and habitat fragmentation. *PLOS One*, 8(8), Article e70647. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070647>
- Bolaños-Sittler, P., Sueur, J., Fuchs, J., & Aubin, T. (2019). Vocalisation of the rare and flagship species *Pharomachrus mocinno* (aves: Trogonidae): Implications for its taxonomy, evolution and conservation. *Bioacoustics*, 29(6), 654-669. <https://doi.org/10.1080/09524622.2019.1647877>
- Carleton, S. A., & Smith, K. G. (2016). Adult nest attendance and diet of nestling resplendent quetzals (*pharomachrus mocinno*) in the Talamanca mountains of Southern Costa Rica. *Ornitología Neotropical*, 27, 181-188. <https://doi.org/10.58843/ornneo.v27i0.116>
- Chen, J., & Wang, Y. (2024). Effects of habitat fragmentation on bird behavior and extinction mechanisms. *International Journal of Molecular Zoology*, 14(2), 97-110. <https://doi.org/10.5376/ijmz.2024.14.0011>
- Centro de Estudios Conservacionistas. (1999). *Plan Maestro 2000 -2004 Biotopo Universitario "Mario Dary Rivera" para la Conservación del Quetzal*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Clark, M. R. (2004). Using the spectacled bear as a conservation tool in the condor bioserve, Ecuador. *Journal of Sustainable Forestry*, 18(2-3), 223-236. https://doi.org/10.1300/j091v18n02_10
- Dayer, A. A. (2020). Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) (version 1.0). In T. S. Schulenberg (Ed.), *Birds of the World* Cornell Lab of Ornithology. <https://doi.org/10.2173/bow.resquel.01>
- Fraser, K., McKinnon, E., & Diamond, A. (2010). Migration, diet, or molt? interpreting stable-hydrogen isotope values in neotropical bats. *Biotropica*, 42(4), 512-517. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00608.x>
- Gillies, C., Beyer, H., & Clair, C. (2011). Fine-scale movement decisions of tropical forest birds in a fragmented landscape. *Ecological Applications*, 21(3), 944-954. <https://doi.org/10.1890/09-2090.1>
- Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad de la Universidad Rafael Landívar. (2018). *Ecosistemas de Guatemala basado en el sistema de clasificación de zonas de vida*.
- Martin, J., Tolon, V., Van Moorter, B., & Calenge, C. (2009). On the use of telemetry in habitat selection studies. In D. Barculo & J. Daniels (Eds.), *Telemetry: Research, technology and applications* (pp. 1-18). Nova Publishers.
- McKinnon, E. A., Fraser, K. C., & Stutchbury, B. J. M. (2013). New discoveries in landbird migration using geolocators, and a flight plan for the future. *Ornithology*, 130(2), 211-222. <https://doi.org/10.1525/auk.2013.12226>
- Paiz, M. C. (1996). Migraciones estacionales del Quetzal (*Pharomachrus mocinno mocinno* de la Llave) en la región de la Sierra de las Minas, Guatemala y sus implicaciones en la conservación de la especie [Tesis de licenciatura, inédita]. Universidad del Valle de Guatemala.
- Powell, G. V. N., & Bjork, R. D. (1994). Implications of Altitudinal Migration for Conservation Strategies to Protect Tropical Biodiversity: A Case Study of the Resplendent Quetzal *Pharomachrus mocinno* at Monteverde, Costa Rica. *Bird Conservation International*, 4(1), 161-174. <https://doi.org/10.1017/S0959270900002744>
- Rogers, M. W., & Allen, M. S. (2011). An ecosystem model for exploring lake restoration effects on fish communities and fisheries in Florida. *Restoration Ecology*, 20(5), 612-622. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2011.00819.x>
- Schulz, U., & Eisermann, K. (2017). Morphometric differentiation between subspecies of Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno mocinno* and *P. m. costaricensis*) based on male uppertail-coverts. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, 137(4), 287-291. <https://doi.org/10.25226/bboc.v137i4.2017.a6>
- Şekercioğlu, Ç., Loarie, S. R., Brenes, F. O., Ehrlich, P. R., & Daily, G. C. (2007). Persistence of forest birds in the Costa Rican agricultural countryside. *Conservation Biology*, 21(2), 482-494. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00655.x>
- Solórzano, S., Baker, A. J., & Oyama, K. (2004). Conservation priorities for resplendent quetzals

- based on analysis of mitochondrial DNA control-region sequences. *Ornithological Applications*, 106(3), 449-456. <https://doi.org/10.1093/condor/106.3.449>
- Solórzano, S., Castillo, S., Valverde, T., & Ávila, L. (2000). Quetzal abundance in relation to fruit availability in a cloud forest in southeastern México. *Biotropica*, 32(3), 523-532. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00498.x>
- Solórzano, S., García-Juárez, M., & Oyama, K. (2009). Genetic diversity and conservation of the resplendent Quetzal *Pharomachrus mocinno* in Mesoamerica. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(1), 241-248. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2009.001.600>
- Solórzano, S., & Oyama, K. (2010). Morphometric and molecular differentiation between Quetzal subspecies of *Pharomachrus mocinno* (Trogoniformes: Trogonidae). *Revista de Biología Tropical*, 58(1), 357-371.
- Wheelwright, N. T. (1983). Fruits and the ecology of resplendent quetzals. *The Auk*, 100(2), 286-301. <https://doi.org/10.1093/auk/100.2.286>

Fenotipo de inestabilidad de microsatélites en Carcinoma colorrectal mediante la expresión de proteínas reparadoras del ADN

*Microsatellite instability phenotype in colorectal carcinoma through
the ADN mismatch repair proteins expression*

Orlando Rodas-Pernillo ^{1,5}, Edith Oregón ³, Oscar Cobar ^{1,2}, Abbas Chakhtoura, J. ⁴,
Hugo Cardona ⁵, Federico Nave ², Elisa Hernández ¹

¹Doctorado en Ciencias Biomédicas, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ciencias Médicas

²Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala

³Universidad de Guadalajara, México ⁴Universidad de Costa Rica

⁵Departamento de Laboratorios Clínicos y Patología, Hospital Roosevelt

*Autor al que se dirige la correspondencia: orodas2241@medicina.usac.edu.gt

Recibido: 22 de noviembre 2023 / Revisión: 17 de mayo 2024 / Aceptado: 05 de agosto 2024

Resumen

El cáncer colorrectal (CCR) es una preocupación significativa en Guatemala y la región, donde la inestabilidad microsatelital (IMS) se ha identificado como un marcador molecular clave en su patogénesis. IMS, caracterizada por mutaciones puntuales, deleciones e inserciones, se observa en aproximadamente el 15% de los casos de CCR, con mayor frecuencia en etapas tempranas de la enfermedad. Este estudio transversal analizó los fenotipos más frecuentes de IMS en CCR mediante la expresión de proteínas reparadoras del ADN, como MSH2, MLH1, MSH6 y PMS2, utilizando técnicas de inmunohistoquímica en 101 casos de pacientes diagnosticados con CCR. Los resultados mostraron una pérdida de expresión de estas proteínas en el 36% de los casos. Las asociaciones significativas fueron entre MLH1/PMS2 y MSH2/MSH6, con $p < .001$, indicando una asociación significativa con el CCR. Además, se identificó que las mujeres presentan un mayor riesgo de desarrollar CCR relacionado con IMS, particularmente en las asociaciones MLH1/PMS2 y MSH6/MSH2. La detección de IMS no solo permite un diagnóstico molecular temprano, sino que también es crucial para la elección del tratamiento. Los pacientes con IMS positiva tienden a tener un mejor pronóstico y son candidatos ideales para tratamientos con inmunoterapia, específicamente con inhibidores de PD-1/PD-L1, lo que podría incrementar su sobrevivencia. Este estudio subraya la importancia de la detección de IMS como parte integral del tratamiento del CCR, contribuyendo a la mejora de los resultados clínicos en la región.

Palabras clave: Cáncer de colorrectal, MSI, MLH1, MLH2, PMS2, MSH6, inmunohistoquímica

Abstract

Colorectal cancer (CRC) is a significant concern in Guatemala and the region, where microsatellite instability (MSI) has been identified as a key molecular marker in its pathogenesis. IMS, characterized by point mutations, deletions and insertions, is seen in approximately 15% of CRC cases, most frequently in early stages of the disease. This cross-sectional study analyzed the most frequent phenotypes of IMS in CRC through the expression of DNA repair proteins, such as MSH2, MLH1, MSH6 and PMS2, using immunohistochemistry techniques in 101 cases of patients diagnosed with CRC. The results showed a loss of expression of these proteins in 36% of cases. The significant associations were between MLH1/PMS2 and MSH2/MSH6, with $p < .001$, indicating a significant association with CRC. Furthermore, women were identified as having a higher risk of developing CRC related to IMS, particularly in the MLH1/PMS2 and MSH6/MSH2 associations. Detection of IMS not only allows for early molecular diagnosis but is also crucial for treatment choice. Patients with positive MSI tend to have a better prognosis and are ideal candidates for immunotherapy treatments, specifically PD-1/PD-L1 inhibitors, which could increase their survival. This study highlights the importance of IMS detection as an integral part of CRC treatment, contributing to the improvement of clinical outcomes in the region.

Keywords: Colorectal cancer, MSI, MLH1, MLH2, PMS2, MSH6, immunohistochemistry



Introducción

El cáncer colorrectal (CCR) es el tercero más común a nivel mundial, con más de 1,926,118 (9.6%) nuevos casos y aproximadamente 903,859 muertes en 2022, según datos de Globocan, 2022 (Bray et al., 2024). La incidencia del cáncer colorrectal varía en función de la edad, observándose un incremento notable en las tasas de incidencia a partir de los 50 años (Burbano Luna et al., 2016). La supervivencia del CCR ha mejorado en los últimos años. En España, la supervivencia a los cinco años se sitúa dentro de la media de los países europeos (49.5% para cáncer de colon y 43% para cáncer de recto). Esta supervivencia depende fundamentalmente del estadio tumoral en el momento del diagnóstico. La etiología del CCR es heterogénea. En el Instituto de Cancerología (Incan) de Guatemala, ocupó el décimo lugar con una incidencia del 1.1% en hombres y 1.3% en mujeres del total de casos en 2014 (Deen et al., 2016; Navarro et al., 2012). Para el año 2019 en el Incan se reporta un incremento en el Cáncer colorrectal con 4.2% (Registro del Cáncer del Instituto de Cancerología, 2022).

La inmunohistoquímica (IHQ) es el método más comúnmente utilizado para evaluar la presencia o ausencia de la expresión de las proteínas MLH1, MSH2, MSH6 y PMS2. La presencia de expresión nuclear de estos marcadores indica un sistema de reparación de ADN intacto y funcional. La aplicación del tamizaje mediante IHQ puede reducir la mortalidad en pacientes con distintos fenotipos de inestabilidad microsatelital (IMS), al permitir la detección temprana de pólipos precoces y, por ende, prevenir la aparición de nuevos casos de CCR. Además, la identificación de IMS a través de IHQ en tejidos sólidos de pacientes con CCR tiene valor terapéutico, ya que facilita la aplicación de terapias dirigidas a pacientes con pérdida de proteínas reparadoras del ADN, siempre y cuando se considere el estadio adecuado de la enfermedad, de acuerdo con las directrices del *American Joint Committee on Cancer* (AJCC) para las piezas de resección parcial o total (Deen et al., 2016).

El síndrome de Lynch, descrito por Henry Lynch en 1966, inicialmente como síndrome de cáncer familiar y posteriormente renombrado como cáncer colorrectal hereditario no asociado a poliposis (CCHNP), es un trastorno autosómico dominante que predispone al CCR y otras neoplasias en órganos como el endometrio, estómago, intestino delgado, riñón, ovario y piel. Este síndrome se debe a mutaciones en genes reparadores del ADN, y su diagnóstico se basa en la

identificación de estas mutaciones a través de criterios clínicos y técnicas moleculares como la inestabilidad microsatelital (IMS) e IHQ. La detección de mutaciones específicas, como la pérdida de expresión del gen MSH2 o la metilación del gen MLH1, permite una identificación eficaz y una reducción en la necesidad de pruebas moleculares adicionales en un 12.7% de los casos (Adar et al., 2017; Giardiello et al., 2014; Lynch et al., 2009; Ortiz et al., 2016; Vasen et al., 2013).

El síndrome de Lynch, la neoplasia colorrectal hereditaria más común, resulta de mutaciones germinales en genes que codifican proteínas del sistema de reparación del ADN (MMR), como MLH1, MSH2, MSH6 y PMS2, que son esenciales para mantener la fidelidad de la replicación del ADN (Cajal et al., 2016; Murillo Bacilio et al., 2018; Quesada Morales et al., 2018). Estas mutaciones provocan MSI en aproximadamente el 15-20% de los adenocarcinomas colorrectales, caracterizándose por un alto nivel de MSI (MSI-H). Los carcinomas asociados a la vía MSI frecuentemente presentan características patológicas específicas, como localización en el colon derecho, edad menor de 50 años, infiltración de linfocitos, y características mucinosas o medulares (Yilmaz et al., 2019; Yuan et al., 2015). Aunque estas características ayudan en la predicción de IMS, no hay una sola característica histológica definitiva para el diagnóstico, pero la combinación de varias puede indicar la presencia de la enfermedad (Martínez et al., 2017).

Materiales y métodos

El estudio, de tipo analítico transversal, recopiló información demográfica, clínica e histopatológica. Los datos fueron ingresados en una base de datos de Excel y se realizaron análisis univariados y bivariados utilizando el software Epi-Info 7. La prueba de asociación empleada fue chi-cuadrado, y valor p para determinar la significancia estadística. El criterio de inclusión fue contar con bloques de parafina adecuados para su estudio. Se excluyeron aquellos casos que no cumplieran con este criterio. Se contó con Aval Bioética de un comité reconocido en Guatemala.

Muestras Tisulares

Se seleccionó una muestra conveniente de 101 casos que cumplieron con los criterios de inclusión. En el Hospital Roosevelt, se incluyeron casos de los años 2019 y 2020, mientras que del laboratorio Patmed

se incluyeron casos del 2017 al 2020. Se tomaron en cuenta muestras de piezas quirúrgicas obtenidas por biopsia o resección en bloque de parafina de CCR, diagnosticadas en el Hospital Roosevelt o Patmed, que contaran con suficiente tejido neoplásico para estudios de inmunohistoquímica (IHQ) y cumplieran con los criterios de inclusión.

Los estudios de IHQ para los anticuerpos IMS dirigidos a las proteínas reparadoras de ADN, como MLH1, MSH2, MSH6 y PMS2, se realizaron en el Laboratorio Privado Patmed utilizando la técnica de procesamiento para IHQ con las siguientes clonas: MLH1 G168-728, MSH2 G216-1129, MSH6 EP49 y PMS2 MRQ-28, de la marca Cell Marque.

Los datos fueron analizados de manera descriptiva, reportándose las características demográficas de los pacientes mediante frecuencias por sexo, promedio y desviación estándar de edad, así como la frecuencia absoluta y porcentajes de negatividad y positividad de

las proteínas reparadoras del ADN. Se realizó un análisis de asociación entre estas proteínas y el sexo de los pacientes mediante la prueba de chi-cuadrado (χ^2) con un nivel de significancia de 0.05.

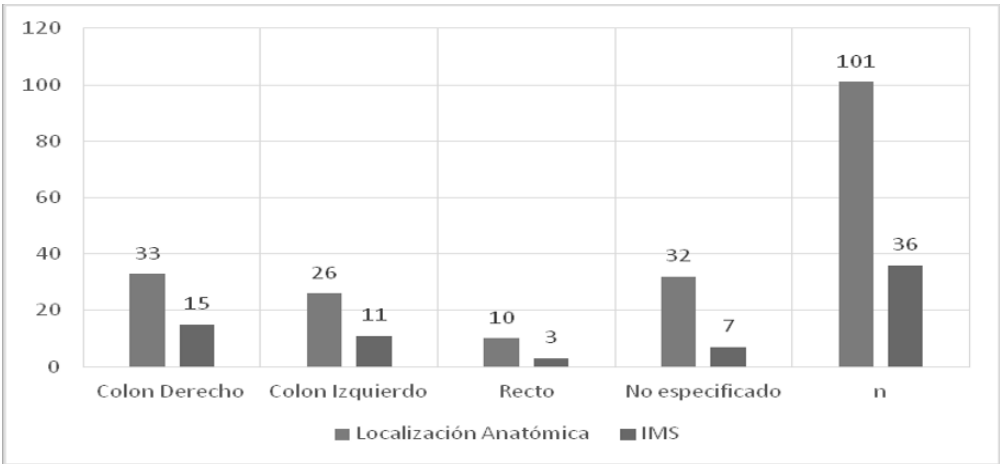
Resultados

En la Tabla 1 presenta las características demográficas de la muestra estudiada, predominando el sexo femenino (64.90%) con un promedio de edad de 62.32 años. La Figura 1 muestra los resultados generales de los anticuerpos IMS y su localización anatómica, evidenciando una negatividad de 36% (MSH6, MLH1, MSH2 y PMS2) y una positividad de IMS del 64%. La Tabla 2 presenta la distribución de frecuencias de negatividad y positividad de las proteínas reparadoras del ADN en los casos estudiados, junto con sus respectivos intervalos de confianza del 95%.

Tabla 1
Características demográficas de los pacientes estudiados (n = 101)

Variable	Frecuencia (%)
Género	
Masculino	36 (35.64 %)
Femenino	65 (64.90%)
Edad promedio en años (Desviación estándar)	62 .32 (15.65)

Figura 1
Localización anatómica e iinestabilidad microsatelital (n = 101)



En la Figura 2, se detalla la distribución de las piezas quirúrgicas según la clasificación de la AJCC, siendo la categoría pT3 la más frecuente con un 46%. Al evaluar la relación entre los anticuerpos, se encontró que la pérdida de expresión de MLH1 y PMS2 muestra una asociación significativa ($p < .001$), determinando que cuando MLH1 es negativo, PMS2 también lo es. De manera similar, la pérdida de expresión de MSH2 y MSH6 mostró una asociación significativa ($p < .001$), indicando que cuando MSH2 es negativo, MSH6 también lo es. La distribución de los anticuerpos IMS por sexo se presenta en la Tabla 3. Se encontró que ser mujer es un factor de riesgo significativo para desa-

rollar cáncer de colon en Guatemala ($p < .001$) para los anticuerpos MLH1 y PMS2. La relación también fue significativa entre sexo femenino y MSH6 y MSH2 ($p < .001$).

Discusión

El CCR es una de las principales causas de mortalidad a nivel mundial y, en Guatemala, tiene una incidencia anual de 7.4 por millón de habitantes (Rodas Pernillo, 2021). La inestabilidad microsatelital (IMS) es una vía molecular patogénica presente en alrededor del 15% de los casos de CCR. Se origina cuando el

Tabla 2

Expresión de anticuerpos por Inestabilidad Microsatelital (n = 101)

Anticuerpo de IMS	Negativo (%) [IC 95%]	Positivo (%) [IC 95%]
MLH1	29.70 [21.02, 39.61]	70.30 [60.39, 78.98]
MSH2	12.87 [7.04, 21.00]	87.13 [79.00, 92.96]
MSH6	34.65 [25.46, 44.77]	65.35 [55.23, 74.54]
PMS2	30.69 [21.90, 40.66]	69.31 [9.34, 78.10]

Figura 2

Clasificación patológica de los casos, según la clasificación Internacional de la AJCC para cáncer colorrectal (n = 101)

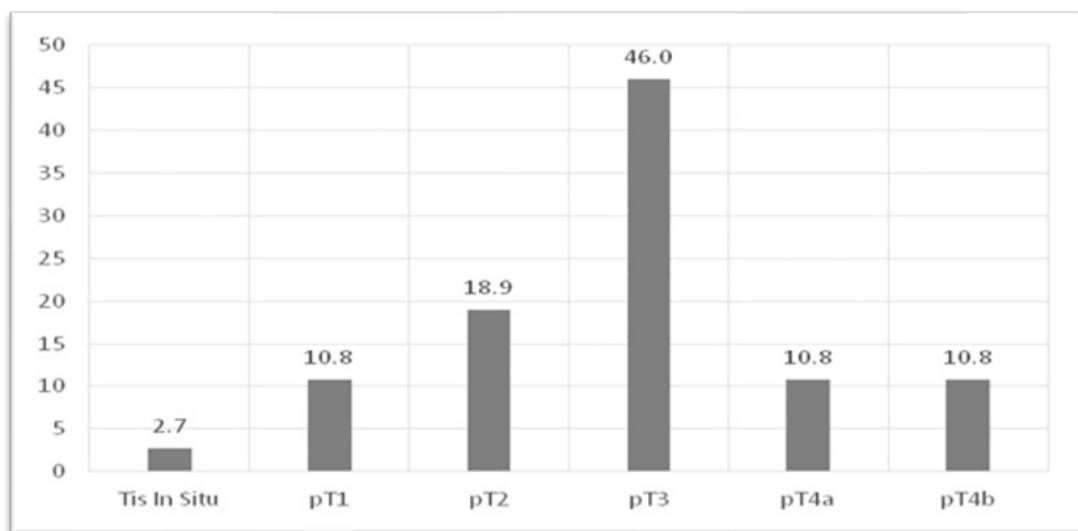


Tabla 3*Relación de anticuerpos IMS por Sexo (n = 101)*

Sexo	Relaciones entre microsatélites	
Masculino	MSH6/MSH2	MLH1/PMS2
χ^2	1.35	4.70
p	0.240	0.029
Femenino	MSH6/MSH2	MLH1/PMS2
χ^2	11.42	17.43
p	< .001	< .001

sistema de reparación de mal apareamiento del ADN, conocido como MMR, es disfuncional, lo que conduce a la acumulación de mutaciones generadas por la ADN polimerasa, tales como mutaciones puntuales, deleciones e inserciones. Estas últimas ocurren principalmente en las secuencias microsatélites, ampliamente distribuidas en el genoma, generando cambios en la longitud de los microsatélites en las células cancerosas, lo que se conoce como IMS (Yassen, 2023). La IMS está presente en cánceres hereditarios y esporádicos, ambos con implicaciones clínicas importantes.

El cáncer hereditario asociado al síndrome de Lynch se debe a mutaciones germinales en los genes del sistema MMR. Este síndrome es un desorden autosómico dominante, caracterizado por un inicio temprano del CCR, con lesiones múltiples y neoplasias en otras localizaciones como el endometrio, estómago, intestino delgado, riñón, ovario y piel (Rodas Pernillo, 2021). Los microsatélites son regiones repetitivas del ADN susceptibles a errores durante la replicación. Estos errores son corregidos por un sistema de reparación, pero cuando los genes están mutados, los errores persisten. Los genes que codifican proteínas reparadoras se expresan en los núcleos de las células colónicas normales, utilizando estudios de IHQ, pero no se expresan en aquellas con mutaciones (Harada & Morlote, 2020).

La IMS representa el 15% de los casos de CCR a nivel mundial, aunque la prevalencia varía según la población, siendo del 15% en Estados Unidos, del 20 al 45% en afroamericanos, y de hasta el 37% en la población egipcia. Del total de casos con IMS, un 20%

corresponde al síndrome de Lynch, mientras que el 80% restante son CCR esporádicos (Ortiz, 2016). Los tumores con IMS suelen localizarse en el colon proximal, son diagnosticados en estadios patológicos bajos y caracterizarse histológicamente por una abundante infiltración de linfocitos en el tumor, pobre diferenciación, células en anillo de sello y fenotipo mucinoso (Ortiz, 2016).

En el estudio realizado, se encontró una pérdida de expresión de anticuerpos IMS (negatividad) en un 36% y una positividad del 64% (Tabla 2). En cuanto al sexo, se observó un predominio femenino con un 65% de los casos de CCR y un 35% en hombres (Tabla 1). Según la literatura indica que el CCR es más frecuente en el sexo masculino y una de las posibles razones de este hallazgo podría ser que en Guatemala las mujeres consultan más que los hombres a los hospitales. Según el grupo etario, hubo un incremento de la frecuencia de casos en pacientes de entre 51 y 60 años, con un 58.3% de los casos en este rango, sugiriendo que a mayor edad, especialmente por encima de los 50 años, aumenta la frecuencia de CCR (Tabla 1). En un estudio realizado en el Incan en 2021, se mencionó que el cáncer de colon es más frecuente en hombres menores de 50 años y en mujeres mayores de 50, aunque en nuestra serie, la mayoría de los pacientes eran mayores de 50 años, lo que podría corresponder a este hallazgo (Rodas Pernillo, 2021).

De las piezas quirúrgicas provenientes de resección de colon, el 46% se encontraban en la categoría pT3 de la AJCC (que atraviesa la muscular propia hasta la subserosa o porción no peritonealizada del mesente-

rio) y un 18.92% en la categoría pT2 (tumor que infiltra hasta la muscular propia) (Figura 1). En este estudio, la relación entre la pérdida de expresión de MLH1 y PMS2 mostró una asociación significativa ($p < .001$). En la Tabla 2, se muestra que la pérdida de expresión de MSH2 y MSH6 también tiene una asociación significativa ($p < .001$). Al asociar los anticuerpos IMS con el sexo, se encontró que ser mujer es un factor de riesgo significativo para desarrollar CCR en Guatemala ($p < .001$) con los anticuerpos MLH1 y PMS2, así como con MSH6 y MSH2. Para el sexo masculino, los valores p y χ^2 no fueron estadísticamente significativos en ambos grupos (Tabla 2).

Se evidenció que la localización anatómica y la ausencia de proteínas reparadoras del ADN mostró una alta frecuencia en el colon derecho (32.67%) y negatividad para la expresión de proteínas reparadoras del ADN (41.66%), lo cual es compatible con el inmunofenotipo de IMS, como se ha observado en la literatura en estudios de cáncer de colon en otros países, siendo el sitio anatómico más frecuente con esta alteración (Figura 1). En este estudio, en general, los anticuerpos IMS realizados por IHQ mostraron una negatividad del 36% y una positividad del 64% (Figura 2).

La incidencia de IMS por IHQ en cáncer de colon a nivel internacional es del 15-20%. Sin embargo, esta cifra puede variar según la población estudiada y el método de detección utilizado. Un estudio realizado en Estados Unidos en 2017 encontró una incidencia de IMS del 19.1% en cáncer de colon. Este estudio incluyó a 1,200 pacientes con cáncer de colon de todas las edades y etapas (Want et al., 2019).

En el presente trabajo se logró estandarizar las pruebas de IHQ para la detección de proteínas MMR, demostrando una alta sensibilidad y especificidad para la identificación de pacientes con IMS (Tabla 3). La prueba de IHQ presenta tanto ventajas como desventajas. En el estudio realizado, se encontró una pérdida de expresión de anticuerpos IMS (negatividad) en un 36% y una positividad del 64% (Tabla 2). Es relativamente fácil de implementar cuando se cuenta con personal capacitado para realizarla y diagnosticar correctamente. La prueba molecular, aunque no es tan costosa, también puede ser utilizada; lo ideal es realizar ambas pruebas (moleculares e IHQ) para aumentar la precisión del estudio. La IMS es un marcador de pronóstico importante en el cáncer de colon. Los pacientes con IMS tienen un mayor riesgo de recurrencia y mortalidad por cáncer. Estos pacientes pueden beneficiarse

de tratamientos más agresivos, como inmunoterapia, quimioterapia adyuvante o terapias dirigidas. Es recomendable capacitar al personal médico en patología para interpretar y realizar estudios de IMS mediante inmunohistoquímica, así como estudios moleculares y citogenéticos, dando seguimiento a los casos para establecer precedentes genéticos a nivel nacional. La implementación rutinaria de estudios de IMS mediante inmunohistoquímica en cáncer de colon permitirá ofrecer a los pacientes tratamientos personalizados mediante inmunoterapia, lo que podría aumentar su expectativa de vida.

Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del Documento: OR-P, EO, OC

Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: OR-P, EO, OC

Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: OR-P, HC

Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: OR-P, AC, HC, FN

Participación en análisis: R-P, AC, HC, FN, EH

Materiales suplementarios

Este artículo no tiene archivos complementarios.

Referencias

- Adar, T., Rodgers, L. H., Shannon, K. M., Yoshida, M., Ma, T., Mattia, A., Lauwers, G. Y., Iafrate, A. J., & Chung, D. C. (2017). A tailored approach to BRAF and MLH1 methylation testing in a universal screening program for Lynch syndrome. *Modern Pathology*, 30(3), 440-447. <https://doi.org/10.1038/modpathol.2016.211>
- Bray, F., Laversanne, M., Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Soerjomataram, I., & Jemal, A. (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 74(3), 229-263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>

- Burbano Luna, D. F., Manrique, M. A., Chávez García, M. Á., Pérez Corona, T., Hernández Velázquez, N. N., Escandón Espinoza, Y. M., Gómez Urrutia, J. M., Rubalcaba Macías, E. J., Martínez Ramírez, G., Cisneros, A. A., García Romero, A., Martínez Galindo, M. G., & Cerna Cardona, J. (2016). Epidemiología del cáncer colorrectal en menores de 50 años en el Hospital Juárez de México. *Endoscopia*, 28(4), 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.endomx.2016.10.008>
- Cajal, A. R., Piñero, T. A., Verzura, A., Santino, J. P., Solano, A. R., Kalfayan, P. G., Ferro, A., & Vaccaro, C. (2016). Mutación fundadora en síndrome de Lynch tipo II. *Medicina (Buenos Aires)*, 76(3), 180-182.
- Deen, K. I., Silva, H., Deen, R., & Chandrasinghe, P. C. (2016). Colorectal cancer in the young, many questions, few answers. *World Journal of Gastrointestinal Oncology*, 8(6), 481. <https://doi.org/10.4251/wjgo.v8.i6.481>
- Giardiello, F. M., Allen, J. I., Axilbund, J. E., Boland, C. R., Burke, C. A., Burt, R. W., Church, J. M., Dominitz, J. A., Johnson, D. A., Kaltenbach, T., Levin, T. R., Lieberman, D. A., Robertson, D. J., Syngal, S., & Rex, D. K. (2014). Guidelines on genetic evaluation and management of Lynch syndrome: A consensus statement by the US Multi-Society Task Force on colorectal cancer. *Gastroenterology*, 147(2), 502-526. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2014.04.001>
- Harada, S., & Morlote, D. (2020). Molecular pathology of colorectal cancer. *Advances in Anatomical Pathology*, 27(1), 20-26. <https://doi.org/10.1097/PAP.0000000000000247>
- Li, L., Zhang, Y., Wang, J., Wang, X., Wang, X., & Wang, Y. (2017). Incidence of microsatellite instability in colorectal cancer: A meta-analysis. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 26(12), 1443-1450. <https://doi.org/10.1186/s12957-019-1706-5>
- Lynch, H. T., P. M., Lanspa, S. J., Snyder, C. L., Lynch, J. F., & Boland, C. R. (2009). Review of the Lynch syndrome: History, molecular genetics, screening, differential diagnosis, and medicolegal ramifications. *Clinical Genetics*, 76(1), 1-18. <https://doi.org/10.1111/j.1399-0004.2009.01230.x>
- Martínez, C. I., Pérez, L. F., Baquero, D., & Barco, A. (2017). Cáncer colorrectal hereditario no asociado a poliposis o síndrome de Lynch. *Revista Colombiana de Cirugía*, 32(4), 297-303. <https://doi.org/10.30944/20117582.38>
- Quesada Morales, M. E., Guallasamin Chalco, E. F., Jara Sanchez, H. E., Fajardo Morales, P. F., & Fernando, P. (2018). Síndrome de Lynch: Caracterización genético clínica y epidemiología. Caso clínico *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas Universidad de Cuenca*, 36(1), 61-68.
- Murillo Bacilio, M. del R., Palta González, A. M., Correa Martínez, F. G., León Pesantez, M. I., & Patiño Murillo, G. E. (2018). Inestabilidad de los microsatélites en cáncer colo-rectal y su distribución de acuerdo a factores pronósticos en SOLCA Cuenca 2004-2014. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas Universidad de Cuenca*, 36(1), 9-16.
- Navarro, S., Pérez-Segura, P., Ramón y Cajal, S., Salazar, R., García-Foncillas, J., Musulén Palet, E., García-Carbonero, R., Payá, A., & García-Alfonso, P. (2012). Recomendación para la determinación de biomarcadores en el carcinoma colorrectal. Consenso Nacional de la Sociedad Española de Anatomía Patológica y de la Sociedad Española de Oncología Médica. *Revista Española de Patología*, 45(3), 130-144. <https://doi.org/10.1016/j.patol.2012.05.001>
- Ortiz, C., Dongo-Pflucker, K., Martín-Cruz, L., Barletta Carrillo, C., Mora-Alferez, P., & Arias, A. (2016). Inestabilidad de microsatélites en pacientes con diagnóstico de cáncer colorrectal. *Revista de Gastroenterología del Perú*, 36(1), 15-22.
- Rodas-Pernillo, O., & Oregón, E. (2021). Identificación del fenotipo de inestabilidad microsatelital en carcinoma colorrectal mediante el análisis de la expresión de proteínas reparadoras del ADN: Revisión narrativa. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 8(2), 232-244. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v8i2.945>
- Registro del Cáncer del Instituto de Cancerología. (2022). *Registro hospitalario año 2019. Informe de casos nuevos de cáncer y defunciones registradas en el Instituto de Cancerología y*

- Hospital "Dr. Bernardo del Valle S." -INCAN- de la Liga Nacional Contra el Cáncer durante el año 2019, por el Registro de Cáncer del INCAN.* <https://www.ligacancerguate.org/index.php/publicaciones-institucionales-liga-cancer-guatemala/estadisticas-incan-guatemala>.
- Vasen, H. F. A., Blanco, I., Aktan-Collan, K., Gopie, J. P., Alonso, A., Aretz, S., Bernstein, I., Bertario, L., Burn, J., Capella, G., Colas, C., Engel, C., Frayling, I. M., Genuardi, M., Heinimann, K., Hes, F. J., Hodgson, S. V., Karagiannis, J. A., Lalloo, F., ... Mallorca group. (2013). Revised guidelines for the clinical management of Lynch syndrome (HNPCC): Recommendations by a group of European experts. *Gut*, 62(6), 812-823. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2012-304356>
- Wang, B., Li, F., Zhou, X., Ma, Y., & Fu, W. (2019). Is microsatellite instability-high really a favorable prognostic factor for advanced colorectal cancer? A meta-analysis. *World journal of surgical oncology*, 17, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12957-019-1706-5>
- Yassen, N. N., Abouelfadl, D. M., Abbas, N. F., Soliman, A., & Shabana, M. E. (2023). Microsatellite instability screening in colorectal carcinoma: Immunohistochemical analysis of MMR proteins in correlation with clinicopathological features and Ki 67 protein expression. *Bulletin of the National Research Centre*, 47, Artículo 155. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3088761/v1>
- Yilmaz, R., Bedir, R., Akdogan, R. A., & Pergel, A. (2019). Evaluation of microsatellite instability in colorectal adenomas and carcinomas by immunohistochemistry and a comparison of histopathological features. *European Journal of Therapeutics*, 25(1), 23-38. <https://doi.org/10.5152/eurjther.2018.582>
- Yuan, L., Chi, Y., Chen, W., Chen, X., Wei, P., Sheng, W., Zhou, X., & Shi, D. (2015). Immunohistochemistry and microsatellite instability analysis in molecular subtyping of colorectal carcinoma based on mismatch repair competency. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 8(11), 20988-21000.

Propagación de dos helechos arborescentes (Cyatheaceae) del bosque nuboso guatemalteco por medio de tres metodologías diferentes

*Propagation of two tree ferns (Cyatheaceae) from the Guatemalan cloud forest
by three different techniques*

Andrea M. Cabarrús  *

*Escuela de Biología, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala

*Autor al que se dirige la correspondencia: andrea.cabarrus@gmail.com

Recibido: 17 de septiembre 2024 / Revisión: 13 de noviembre 2024 / Aceptado: 20 de diciembre 2024

Resumen

Los helechos arborescentes de la familia Cyatheaceae están en especial peligro. Son organismos de crecimiento lento, y su extracción de los bosques originarios para el uso como sustituto de sustrato para bromelias y orquídeas ha colocado en riesgo las poblaciones locales. Al ser organismos que tienen requerimientos especiales para su crecimiento y desarrollo, un acercamiento a su propagación podría ser la base para ejecutar futuros proyectos de conservación de las especies. Se contrastaron durante cuarenta semanas tres tratamientos diferentes de propagación de esporas para las especies *Cyathea divergens* var. *tuerckheimii* (Maxon) R.M. Tryon y *Sphaeropteris horrida* (Liebm.) R.M. Tryon; también se evaluaron tres especies de interés comercial y de fácil propagación como referencia. Se usó un método de propagación convencional con un sustrato de musgo de turba preparado como control, un tratamiento in vitro utilizando el medio de cultivo Murashige & Skoog completo (M&S 100) y a media concentración de nutrientes (M&S 50) y un medio alternativo de propagación por un sustrato artificial de tela de algodón. El objetivo era encontrar un medio favorable económicamente, cuyo índice de germinación y establecimiento fuera adecuado para futuros programas de propagación de estas especies. Se encontró que en la técnica in vitro se obtuvo una germinación del 93.15% para *S. horrida*, sin embargo *C. divergens* obtuvo 5.2% únicamente. Se generaron un total de 1224 plántulas jóvenes de *S. horrida*, y ninguna de *C. divergens*. En cuanto a los costos de producción, el costo promedio por esporofito obtenido fue de Q1.10 para el cultivo en sustrato y de Q95.96 para los obtenidos en el cultivo en laboratorio.

Palabras clave: *Cyathea*, *Sphaeropteris*, conservación, propagación, cultivo

Abstract

The tree ferns of the Cyatheaceae family are in danger. They are slow-growing organisms, and their extraction from native forests for use as a substrate substitute for bromeliads and orchids has placed local populations at risk. As organisms with specific requirements for growth and development, an approach to their propagation could serve as the foundation for future conservation projects for these species. Over a period of forty weeks, three different spore propagation methods were compared for the species *Cyathea divergens* var. *tuerckheimii* (Maxon) R.M. Tryon and *Sphaeropteris horrida* (Liebm.) R.M. Tryon.; three commercially valuable and easily propagated species were also evaluated as references. A conventional propagation method using prepared peat moss substrate was used as a control, an in vitro treatment using full-strength Murashige & Skoog culture medium (M&S 100) and half-strength nutrient concentration (M&S 50), and an alternative propagation method using an artificial cotton cloth substrate. The goal was to find a cost-effective medium with a germination and establishment rate suitable for future propagation programs of these species. It was found that the in vitro technique achieved a germination rate of 93.15% for *S. horrida*, while *C. divergens* achieved only 5.2%. A total of 1,224 young sporophytes of *S. horrida* were produced, and none of *C. divergens*. In terms of production costs, the average cost per sporophyte obtained was Q1.10 for substrate cultivation and Q95.96 for laboratory cultivation.

Keywords: *Cyathea*, *Sphaeropteris*, conservation, propagation, cultivation

Introducción

Los helechos son plantas vasculares que se caracterizan por su reproducción por medio de esporas (Escámez, 1989; Hoshizaki & Moran, 2001). Tienen un ciclo de vida con alternancia de generaciones entre los gametofitos independientes (n) y los esporofitos ($2n$) que también son independientes, esto los diferencia tanto de las briofitas como de las plantas vasculares con semillas (Christenhusz & Chase, 2014; Escámez, 1989). Los helechos pueden presentar variaciones en su fenología, según familias, géneros y especies (Pérez-García & Reyes-Jaramillo, 1993). Existen unas 12,000 especies identificadas en todo el mundo, de las cuales en Guatemala se han identificado cerca de 782 (Christenhusz & Chase, 2014; Hoshizaki & Moran, 2001; Jiménez Barrios, 2009; Véliz Pérez, 2008; Véliz Pérez & Vargas Ponce, 2006). De todas las especies conocidas en el país, se reportan en la actualidad 21 helechos arborescentes pertenecientes a nueve géneros en total (Véliz Pérez & Vargas Ponce, 2006).

Los helechos forman parte imprescindible de los ecosistemas, y son esenciales para los ciclos del agua, el nitrógeno, el carbono, entre otros (Jiménez Barrios, 2009; Mehlreter et al., 2010; Stadtmüller, 1986). Los helechos arborescentes están en especial peligro, ya que son organismos de crecimiento lento, y su extracción de los bosques originarios del país ha colocado en riesgo las poblaciones locales (Muñiz Díaz de León et al., 2007; Salinas et al., 2008; Véliz Pérez & Vargas Ponce, 2006). La cosecha masiva de las masas de raíces surte a la demanda de los viveros y extractores de epífitas, sobre todo de orquídeas y bromelias (Véliz Pérez & Vargas Ponce, 2006).

El ciclo de vida comienza con una espora. La espora germina y da origen a la estructura conocida como gametofito (n) (Campbell & Reece, 2007; Hoshizaki & Moran, 2001; Mehlreter et al., 2010). La germinación de las esporas se activa, en la mayoría de los casos, por una combinación de la exposición a la humedad, exposición a la luz y a veces se ve influenciada por exposición a hormonas de otros gametofitos ya desarrollados, que pueden inhibir o favorecer el desarrollo de más individuos (Mehlreter et al., 2010; Riaño Ospina et al., 2015). Una vez se desarrollan los gametofitos, maduran e inician la producción de gametos. El gameto masculino es una célula móvil, la cual necesita una película de agua para poder alcanzar a la ovocélula, que permanece inserta en el gametofito femenino. Una vez ocurre la fecundación se forma el

cigoto ($2n$), seguido por un embrión que posteriormente será un esporofito (Campbell & Reece, 2007; Ranker & Haufler, 2008; Schneider, 2012). Una vez formado el esporofito, se tiene una fase juvenil e inmadura, durante la cual el helecho crece y se desarrolla, pero sin formar ninguna estructura productora de esporas, en esta fase los frondes que suelen desarrollarse presentan diferencias morfológicas con los frondes adultos (Barros et al., 2008; Hoshizaki & Moran, 2001; Mehlreter et al., 2010). Una vez alcanzada la madurez del organismo y ya establecida la formación de frondes adultos, se comienzan a tener esporangios, agrupados en soros, y estos se agrupan en patrones diferenciados (Campbell & Reece, 2007; Hoshizaki & Moran, 2001). Dentro de los esporangios ocurre la esporogénesis, la vía productora de esporas, para que luego de madurar sean liberadas y así de inicio el ciclo de un nuevo organismo (Ranker & Haufler, 2008).

La conservación ex situ de los helechos ha sido practicada utilizando varias técnicas: reproducción por esporas, reproducción vegetativa y reproducción in vitro (Barros et al., 2008; Jiménez Barrios, 2012; López-Romero et al., 2016; Ruiz Robleto, 1995). Una desventaja del método de laboratorio es que los organismos que están adaptados a las condiciones ideales del cultivo in vitro, deben pasar por una fase posterior de aclimatación en invernadero, es esta fase en la cual se pueden perder la mayoría de individuos si no se genera un protocolo correcto (Barros et al., 2008; Jiménez Barrios, 2012; López-Romero et al., 2016; Ruiz Robleto, 1995).

La siembra convencional de esporas consiste en su dispersión en un medio controlado. El sustrato más utilizado para este método es musgo de turba con perlita y vermiculita en diferentes proporciones, a un pH entre 5.5 y 6.5 (Barros et al., 2008; Bernabe et al., 1999). El otro método de propagación por esporas es por cultivo in vitro por medio de la técnica de cultivo de tejidos vegetales (CT). El CT maneja condiciones estrictas de laboratorio (Fernández et al., 2013; Seguí Simarro, 2010). El sembrador utiliza un medio de cultivo nutritivo a su elección donde se colocan los cultivos deseados en contenedores ya estériles y, en condiciones de laboratorio, se almacenan hasta la germinación, formación de las plántulas y posterior establecimiento (Rechenmacher et al., 2010; Sharpy et al., 2015). Aunque es un método exitoso de propagación para casi cualquier tipo de organismo vegetal, el costo de producción es alto (Barros et al., 2008; Martín Gordo et al., 2012). Otro método propuesto en esta investiga-

ción fue una modificación del método utilizado por el botánico alemán Uwe Martin Herbert Feldhoff Böhm para la propagación de bromelias y orquídeas que su empresa, Claveles del Aire, S.A., exporta. La técnica consiste en sustituir el sustrato común por un medio sintético, como sería un lienzo de tela o de algodón. Lo anterior se basa en un principio básico para la germinación de semillas y esporas, el cual establece que para la germinación únicamente se necesita humedad, esto es para romper la latencia inicial, denominada fase I (Azcón-Bieto & Talón, 2013.; Escaso Santos et al., 2010). Este método podría economizar recursos, haciendo aún más viable la propagación de los helechos a bajo costo, en comparación con los otros métodos.

Se contrastaron los tres métodos de propagación: convencional, in vitro y la modificación del método Feldhoff para validar una metodología para la propagación y establecimiento de helechos arborescentes que sea económicamente viable en base a la relación costo-beneficio de cada método.

Materiales y Métodos

Muestras

Los frondes y las esporas fueron colectados en dos sitios representativos del bosque nuboso guatemalteco y en temporalidades distintas. Para elegir a los individuos se usaron los criterios de: helecho maduro, con esporas presentes, y más de tres frondes para no afectar el crecimiento del helecho ni colocar en riesgo su subsistencia. El primer grupo fue colectado en el Biotopo para la Conservación del Quetzal “Mario Dary Rivera” en diciembre de 2018. Se eligieron tres individuos de la especie *Cyathea divergens* var. *tuerckheimii* al azar en los senderos del parque y se colectó del único individuo de la especie *Sphaeropteris horrida* que está ubicado en la entrada del parque. La segunda colecta se realizó en el mes de julio de 2019 en la Reserva Natural Privada ORQUIGONIA. Se eligieron tres individuos de ambas especies al azar, fuera de los senderos a los que el público tiene acceso.

Se colectaron además esporas de tres especies de helechos ornamentales y/o de fácil cuidado con el fin de validar los tratamientos utilizados para los helechos arborescentes. Estos helechos fueron colectados: *Adiantum* sp. en los lugares de colecta de los helechos arborescentes. *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott en el Jardín Botánico CECON-USAC y *Asplenium antiquum*

Makino en dos jardines urbanos de la ciudad de Guatemala. El manejo, secado y extracción de esporas fue estandarizado siguiendo las sugerencias y lineamientos de varios autores (Farfán-Santillán et al., 2017; Gabriel y Galán et al., 2008; Juárez-Orozco et al., 2013; López-Romero et al., 2016; Riaño Ospina et al., 2015).

Desinfección de las esporas

La esterilización de las esporas antes de la siembra también fue estandarizada tomando como base la desinfección de Pence (2015). Se colocaron las esporas previamente pesadas (0.12g para cada serie/repetición por especie) en un papel filtro de cafetera comercial y se aseguró el extremo superior con un hule de papelería de oficina. Esta bolsita de esporas se colocó por 15 min en 100 ml etanol 70%, luego se sumergieron en 80 ml de hipoclorito de sodio 4% v/v con 2 gotas del agente dispersante de superficie Tween 20® y finalmente se dieron 3 lavados de 10 min cada uno en agua estéril. Luego de la esterilización se procedió a la siembra.

Siembra

Tratamiento 1: siembra convencional

Para la siembra convencional se usaron cajas de acrílico de capacidad de 12 L cada una, 5 repeticiones por especie con 0.12 g de esporas cada una. El sustrato utilizado fue de musgo de turba preparado con perlita y vermiculita y un pH de 6. Se dividió cada unidad experimental en seis secciones igual y las esporas fueron sembradas por aspersión, colocando los 0.12 g de esporas ya desinfectadas en 100 ml de agua desmineralizada estéril, mezclando con un agitador de vidrio y tomando alícuotas de 5 ml con una jeringa comercial sin aguja y liberando su contenido en los cuadrantes de la unidad experimental. Se añadieron 16ml de la suspensión de esporas y agua por cuadrante. Luego de la siembra se identificaron las unidades experimentales, se les colocó tapa y se apilaron en el lugar correspondiente.

Tratamiento 2: siembra in vitro

Se utilizó el medio de cultivo Murashige & Skoog (M&S). Se colocaron 50 ml de medio de cultivo en frascos de vidrio de 9 oz de capacidad. Se esterilizó todo el material a utilizar y el medio de cultivo en au-

toclave por 25 min a 125 °C y 20 psi. La desinfección de las esporas se hizo dentro de la campana de flujo laminar lista para la siembra, con equipo y cristalería también ya estéril. Para la siembra se procedió a abrir el papel filtro en su totalidad y extenderlo en la superficie, se dividió en 10 partes iguales, cada una de ellas correspondiente a una unidad experimental. Se colocó dentro el frasco el papel filtro con las esporas boca abajo, en contacto directo con el medio de cultivo, con las pinzas se retiró el papel y se añadieron 4 gotas de agua desmineralizada estéril, se agitó con cuidado para que las esporas se dispersaran en todo el medio de cultivo, se procedió a tapar cada frasco y a su identificación. Fueron depositados en el cuarto de crecimiento con un fotoperiodo de 12 h y una temperatura promedio entre los 21 y los 26 °C.

Tratamiento 3: nueva metodología propuesta

Se usaron cajas de acrílico de capacidad de 12 L cada una, 5 repeticiones por especie con 0.12 g de esporas cada una. Se colocaron 3 capas de algodón quirúrgico en el fondo, seguidas de 2 capas de tela de algodón de nombre comercial Ojo de Perdiz. La siembra se realizó por medio de aspersión igual que en el tratamiento 1. Luego de la siembra se identificaron las unidades experimentales, se les colocó tapa y se apilaron en el lugar correspondiente.

Análisis estadísticos y procesamiento de datos

Para poder tener puntos de comparación entre los métodos a ejecutar se tomaron los estándares propuestos por Barros et al., (2008), Bernabeet al., (1999) y Rünk y Zobel (2009): el apareamiento de puntos verdes indicaba el inicio de la germinación (fase 1) esta fase debe presentarse en las primeras siete semanas a veinte semanas; el inicio de la formación de gametofitos inmaduros (fase 2) durante las siguientes cinco a siete semanas, la estructura es una lámina verde, uniestratificada sin forma o levemente cordiforme; el surgimiento de gametofitos maduros (fase 3) durante las siguientes diez semanas, se identifica principalmente por su forma cordiforme y tamaño; y el surgimiento de esporofitos jóvenes (fase 4), esta etapa inicia con la primera observación de un fronde joven que surge del gametofito femenino luego de la fecundación. Los esporofitos son de desarrollo lento, para esta fase se establecieron las semanas restantes del estudio, ya que los esporofitos jóvenes son propensos a enfermar o a

no establecerse de manera correcta si las condiciones no son las adecuadas. El tiempo de análisis y toma de datos fue de cuarenta semanas luego de la siembra. Se realizó el análisis de los rendimientos de germinación utilizando el índice de cobertura de Braun-Blanquet (Narváez-Parra et al., 2013; Ramírez et al., 2000; Reyes et al., 2019; Turner et al., 2001).

Se dividieron las unidades experimentales en partes iguales por medio de una grilla digital, correspondientes a 1% de germinación en los tratamientos 1 y 3, y al 1.15% de germinación en el tratamiento 2. El acumulado de la germinación se registró semanalmente durante 40 semanas, tomando fotografías profesionales y analizándolas con Adobe® LightRoom® CC ver. 15.8 y Adobe® Photoshop® CC ver 15.6 con el fin de resaltar los tonos verdes, verde-azulados y verde-amarillos y así distinguir los gametofitos de las partículas de sustrato, las imperfecciones de la tela y resaltarlos en el medio de cultivo in vitro.

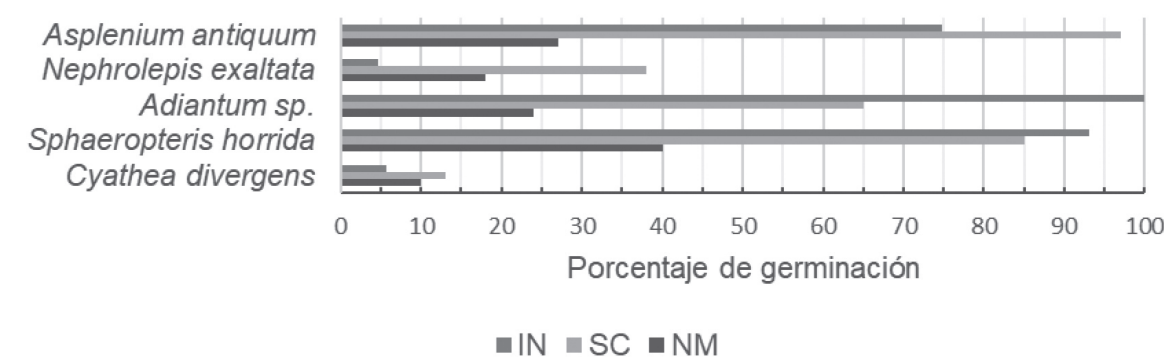
La eficacia de los métodos se evaluó según los siguientes criterios: tiempo de germinación en días; tiempo de formación del primer esporofito en días; tiempo de establecimiento, en días o hasta el final del tiempo establecido de análisis y toma de datos; número total de organismos establecidos; relación costo/beneficio en quetzales y costo por plántula generada por cada uno de los métodos.

Resultados

La germinación se dio en todos los métodos para las cinco especies evaluadas. En la Figura 1 se observan los porcentajes de germinación alcanzados por tratamiento. El método in vitro fue el más exitoso alcanzando hasta el 100% de germinación en las unidades de siembra para *Adiantum* sp. Seguido del 93.15% para *S. horrida* y 74.75% para *A. antiquum* en periodos cortos de tiempo. Estas tres especies también obtuvieron mejor germinación en los otros dos tratamientos. Para *C. divergens* y *N. exaltata* los rendimientos fueron los más bajos, siendo *C. divergens* la especie con menores porcentajes de germinación en todos los métodos evaluados. El cultivo in vitro obtuvo los mejores porcentajes de germinación para todas las especies. Mientras que el tratamiento con menores porcentajes de germinación para todas las especies fue el del sustrato sintético.

Se procesaron un total de 10,955 fotografías para evaluar las fenologías. En los tres tratamientos evaluados todas las especies germinaron y

Figura 1
Porcentajes de germinación alcanzados por tratamiento en las diferentes especies del estudio

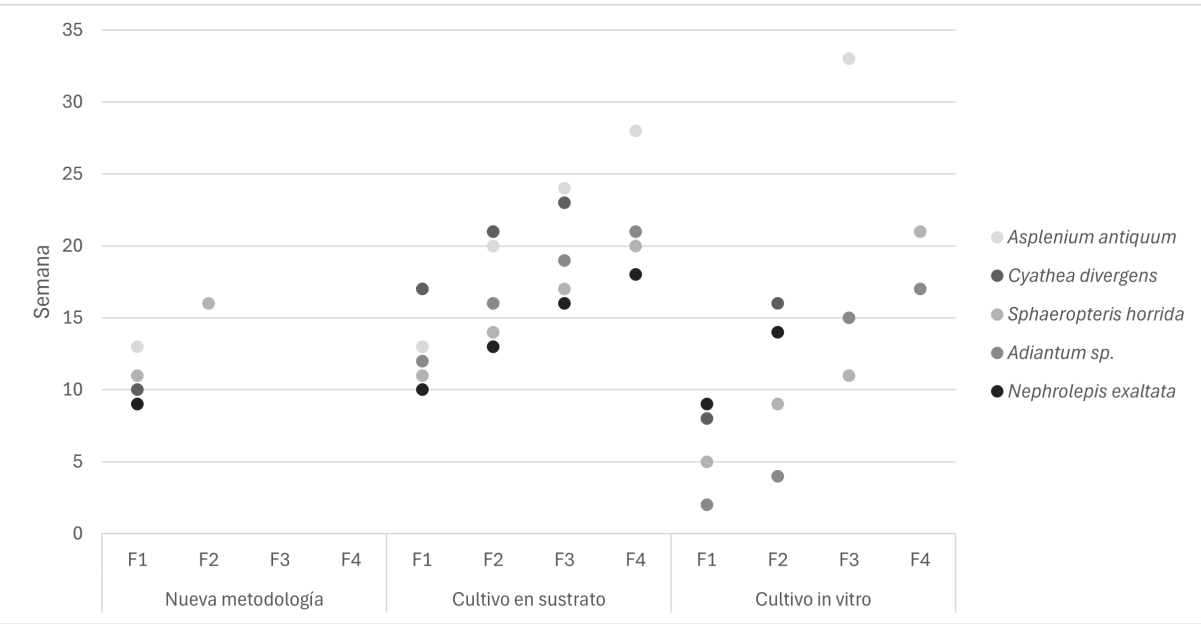


Nota. *IN = siembra in vitro; SC = siembra convencional; NM = siembra nueva metodología.

alcanzaron la fase 1. Para el cultivo en sustrato y el sustrato sintético la germinación se dio en las primeras 2 a 15 semanas, mientras que en el cultivo in vitro el tiempo se redujo de 5 a 10 semanas. En la Figura 2 se observan las fenologías por especie por tratamiento.

Durante las 40 semanas de evaluación se obtuvieron un total de 3,309 helechos diferenciados de las cinco especies y los tres tratamientos evaluados. De estos el 98.25% se obtuvieron con el tratamiento del sustrato y únicamente un 1.75% con el método in vitro.

Figura 2
Fenologías observadas para las cuatro fases de desarrollo propuestas en las especies analizadas



En el sustrato se obtuvieron un total de 3252 organismos de cuatro especies, se obtuvieron únicamente 57 individuos en el laboratorio y no se formó ningún esporofito en el sustrato sintético (Tabla 1). Como se observa en la Tabla 2 el valor por individuo obtenido es

de Q1.10 para el cultivo en sustrato, y de Q95.06 para el cultivo in vitro. El costo de una planta cultivada en sustrato representa únicamente el 1.14% de los costos de una planta cultivada in vitro. El costo elevado de los esporofitos obtenidos in vitro se debe principalmente

Tabla 1

Esporofitos generados por método de siembra y especie durante el estudio

Especie	Esporofitos generados (individuos)		
	NM	SC	IN
<i>Cyathea divergens</i>	0	0	7
<i>Sphaeropteris horrida</i>	0	1224	46
<i>Adiantum</i> sp.	0	205	4
<i>Nephrolepis exaltata</i>	0	321	0
<i>Asplenium antiquum</i>	0	1502	0
Total	0	3252	57

Nota. *IN = siembra in vitro; SC = siembra convencional; NM = siembra nueva metodología.

Tabla 2

Resumen de los costos de producción

Categoría	Nuevo Método		Cultivo en Sustrato	Cultivo in vitro
Extracción esporas			Q 22.23	
Desinfección esporas			Q 2.36	
Siembra	Q 3,066.20		Q 3,552.90	Q 720.00
Mantenimiento de los cultivos por 40 semanas*	Q 0.17		Q 0.17	Q 4,725.09
Aclimatación	NA		Q 0.17	NA
TOTAL costos de producción	Q 3,090.96		Q 3,577.83	Q 5,469.68
Costo promedio final por planta	NA		Q 1.10	Q 95.96

a la realización de cuatro subcultivos del material obtenido de la germinación original incurriendo en altos gastos de mantenimiento y rotación de los cultivos.

En base a los costos de producción generados durante 40 semanas de experimentación, se puede deducir que el método convencional de cultivo es el ideal para el cultivo y desarrollo de los helechos trabajados en la presente investigación. El método, aunque con porcentajes de germinación menores que en el cultivo in vitro y en tiempos más largos, genera esporofitos ya adaptados a sustrato, sin la necesidad de sub-cultivar los gametofitos obtenidos, ni manipularlos de ninguna manera. También presenta las ventajas de que las cajas acrílicas son fácilmente apilables, generan bajos costos de mantenimiento a cambio de una gran cantidad de organismos en pequeños espacios.

Discusión

Se ha evidenciado que los medios de cultivos bajos en nutrientes y/o azúcares, junto con un buen manejo espacial del cultivo, son óptimas para la propagación de *Cyathea aff. caracasana* (Narváez-Parra et al., 2013) y *Cyathea robertsiana* (Goller & Rybczyński, 2007). Ha habido intentos en diferentes ocasiones para la reproducción in vitro del género *Cyathea* (Narváez-Parra et al., 2013; Riaño Ospina et al., 2015; Randi & Hiendlmeyer, 2007; Rechenmacher et al., 2010; Shukla & Khare, 2012). El género parece responder bien a diferentes métodos de cultivo con la condición de bajas concentraciones de carbohidratos y/o nutrientes. Otros autores han reportado también un pH ligeramente ácido, entre 5.6 y 5.8 parece ser el más indicado para la germinación de los helechos en general, y clave para la germinación de *C. bicrenata* (Reyes et al., 2019) lo mismo que para *C. aff caracasana* (Narváez-Parra et al., 2013).

Como se observa en las Figuras 1 y 2, *Cyathea divergens* var. *tuerckheimii* no respondió bien al método Feldhoff, ni al método convencional, presentando bajos porcentajes de germinación y desarrollo. Esto pudo deberse a las concentraciones de nutrientes y a las condiciones de acidez a la que se encontraban los cultivos. El pH de la tela era de 6.6 debido al agua utilizada para humedecer la tela, mientras que el pH del peat-moss era de 5.9 y el del medio de cultivo M&S fue de 5.8. Así mismo la disponibilidad de nutrientes era

nula en el tratamiento de la tela y muy bajo en el tratamiento convencional, esto puede explicar la baja tasa de germinación en el sustrato, y el mejor rendimiento de la germinación en el laboratorio. En cambio, en el cultivo in vitro se obtuvo buen porcentaje de germinación, como se observa en las Figuras 1 y 2, aunque no se llegó a la fase esporofítica, esto puede sugerir que el ciclo de vida de este helecho requiere de más tiempo para madurar y desarrollarse en comparación con *S. horrida*.

S. horrida ha demostrado ser una especie de crecimiento más rápido en comparación con otros helechos arborescentes, así mismo lo distingue su particular tolerancia a cambios de temperatura más bruscos, exposición directa al sol por más tiempo y cambios de humedad (Briones & Riaño, 2014; Olsen, 2007). Esta plasticidad les confiere una mayor supervivencia ante los cambios del bosque nublado de donde son originarios (Briones & Riaño, 2014).

Como se observa en las Figuras 1 y 2 *S. horrida* presentó tolerancia a las diferentes condiciones de los tres tratamientos, diferentes niveles de pH y disponibilidad de nutrientes en el medio de cultivo. Tuvo un buen rendimiento en el sustrato y la diferenciación de los individuos a partir de un 4to subcultivo in vitro sugiere que en un subcultivo más se hubiera obtenido fácilmente hasta cuatro veces más esporofitos que en el cultivo convencional.

Para los fines de conservación de esta investigación, el costo de una planta producida in vitro no podrá competir con el costo de una planta producida en sustrato. Como se observa en las Tablas 1 y 2, el método de sustrato fue el más eficiente ya que, en las 40 semanas de experimentación, se obtuvieron más de 3,000 esporofitos de las 5 especies trabajadas, en comparación con 57 obtenidos en laboratorio en el mismo tiempo.

Se concluye que los gastos generados durante el cultivo en sustrato proveyeron un beneficio que compensó la reducción en el porcentaje de germinación con relación al cultivo in vitro. Los porcentajes de germinación fueron altos, el protocolo de desinfección fue validado, y se obtuvo un primer acercamiento a las especies deseadas. Así mismo las unidades de germinación, y otros materiales utilizados para la siembra en sustrato serían una inversión inicial, pues pueden ser reutilizados indefinidamente mientras se les dé un manejo adecuado.

Agradecimientos

Gracias a Corporación TAK Centroamérica, la Facultad de Agronomía (USAC) y el Jardín Botánico CECON-USAC por brindarme las instalaciones necesarias y equipo para esta investigación.

Al Ing. Estuardo Archila, a la Inga. Angela Meoño, al Dr. Jorge Mario Vargas y al botánico Uwe Feldhoff (QED) por su asesoría y colaboración en la obtención de datos y revisión de este trabajo.

Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del Documento: AMC

Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: AMC

Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: AMC

Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: AMC

Participación en análisis de datos, estructura y en la escritura del documento: AMC

Materiales suplementarios

Este artículo no tiene archivos complementarios.

Referencias

- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (Coord.). (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (2013). (2.^a ed.). McGrawHill.
- Barros, A., Salinero, C., Vela, P., & Sainz, M. J. (2008). Método rápido para la propagación de helechos ornamentales. *Actas de Horticultura*, 52, 350-354.
- Bernabe, N., Williams-Linera, G., & Palacios-Rios, M. (1999). Tree ferns in the interior and at the edge of a Mexican cloud forest remnant: Spore germination and sporophyte survival and establishment. *Biotropica*, 31(1), 83-88. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.1999.tb00118.x>
- Briones, O., & Riaño, K. (2014). Ecofisiología de helechos del bosque nublado. En *Botánica na América Latina* (pp. 212-222). <https://doi.org/10.13140/2.1.1835.8723>
- Campbell, N., & Reece, J. (2007). *Biología* (7.^a ed.). Médica Panamericana.
- Christenhusz, M. J. M., & Chase, M. W. (2014). Trends and concepts in fern classification. *Annals of Botany*, 113, 571-594. <https://doi.org/10.1093/aob/mct299>
- Escámez Pastrana, A. M. (1989). Los helechos: Elementos esenciales en la conservación de nuestra flora. *Aldaba*, (13), 79-118. <https://doi.org/10.5944/aldaba.13.1989.20147>
- Escaso Santos, F., Martínez Guitarte, J. L., & Planelló Carro, M. del R. (2010). *Fundamentos básicos de fisiología vegetal y animal*. Pearson Educación. <https://www.biblionline.pearson.com/Pages/BookDetail.aspx?b=661>
- Farfán-Santillán, N., Mendoza-Ruiz, A., Pérez-García, B., & Velázquez-Montes, E. (2017). Desarrollo de los gametofitos de especies Mexicanas de helechos de la familia Gleicheniaceae. *Revista de Biología Tropical*, 65(3), 939-952. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i3.26346>
- Fernández, E., Casares, A., & Ordás, R. (2013). *Prácticas de biotecnología vegetal*. Universidad de Oviedo.
- Gabriel y Galán, J. M., Prada, C., & Rolleri, C. H. (2008). Germinación de la espora, morfología del gametofito y expresión sexual de *Polypodium feuillei* Bertero (Polypodiaceae). *Gayana*, 65(1), 14-22.
- Goller, K., & Rybczyński, J. J. (2007). Gametophyte and Sporophyte of tree ferns in vitro culture. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76(3), 193-199. <https://doi.org/10.5586/asbp.2007.022>
- Hoshizaki, B. J., & Moran, R. C. (2001). *Fern Grower's Manual*. Timber Press.
- Jiménez Barrios, J. B., (2009). *Diversidad de helechos (Monilophyta) en las áreas protegidas del Corredor del Bosque nubosos, en Purulhá, Baja Verapaz* [Tesis de licenciatura, Universidad San Carlos de Guatemala]. <https://biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/tesis/B202.pdf>
- Jiménez Barrios, J. B. (2012). Los Helechos (Monilophyta: psilotopsida, equisetopsida, marattiopsida y polypodiopsida) de Guatemala. En E. B. Cano & J. C. Schuster (Eds.), *Biodiversidad de Guatemala* (Volumen 2, pp. 9-16). Universidad del Valle de Guatemala.

- Juárez-Orozco, S., Orozco-Segovia, A., Mendoza-Ruiz, A., & Pérez-García, B. (2013). Spore germination of eight homosporous ferns in a temperature gradient. *South African Journal of Botany*, 87, 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.04.005>
- López-Romero, J. M., Riaño, K., & Briones, O. (2016). Germinación y frecuencia de esporofitos de dos especies simpátricas de *Blechnum* (Blechnaceae). *Acta Botanica Mexicana*, (117), 47-58. <https://doi.org/10.21829/abm117.2016.1167>
- Martin Gordo, D. A., Cárdenas Gonzalez, O., & Pacheco, J. C. (2012). Sustancias utilizadas como agente gelificante alternativas al agar en medios de cultivo para propagación in vitro. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(2), 49-62. <https://doi.org/10.22490/21456453.972>
- Mehlreter, K., Walker, L., & Sharpe, J. (2010). *Fern ecology*. Cambridge University Press.
- Muñiz Díaz de León, M. E., Mendoza-Ruiz, A., & Pérez-García, B. (2007). Usos de los helechos y plantas afines. *Etnobiología*, 5(1), 117-125.
- Narváez-Parra, E., Jérez-Jaimes, J. H., & Mantilla-Serrano, J. E. (2013). Etapas de desarrollo in vitro del gametofito del helecho arborescente *Cyathea aff caracasana* (Klotzsch) Domin. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 74-84.
- Olsen, S. (2007). *Encyclopedia of garden ferns*. Timber Press.
- Pence, V. C. (2015). Propagation and cryopreservation of *Asplenium scolopendrium* var. *americanum*, the American hart's-tongue fern. *American Fern Journal*, 105(3), 211-225. <https://doi.org/10.1640/0002-8444-105.3.211>
- Pérez-García, B., & Reyes-Jaramillo, I. (1993). Helechos: Propagación y conservación. *Ciencias*, 30, 10-17.
- Ramírez, M. del R., Pérez-García, B., & Riba, R. (2000). El suelo... un banco natural de esporas y helechos. *Contacto S*, 36, 15-18.
- Randi, A. M., & Hiendlmeyer, R. (2007). Response of spores and young gametophytes of *Cyathea delgadii* Sternb. (Cyatheaceae) and *Blechnum brasiliense* Desv. (Blechnaceae) to different light levels. *Acta Botanica Brasilica*, 21(4), 909-914.
- Ranker, T., & Haufler, C. (2008). *Biology and evolution of ferns and lycophytes*. Cambridge University Press.
- Rechenmacher, C., Schmitt, J., & Droste, A. (2010). Spore germination and gametophyte development of *Cyathea atrovirens* (Langsd. & Fisch.) Domin (Cyatheaceae) under different pH conditions. *Brazilian Journal of Biology*, 70(4 suppl.), 1155-1160. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842010000600004>
- Reyes, S. A., González, H., Castillo, A. M., Volke, V. H., Jacinto, C., Carvajal, C., & García, G. (2019). Importancia del pH y protocolo de desinfección en la germinación de esporas de *Cyathea bicrenata*. *BioTecnología*, 23(1), 22-31.
- Riaño Ospina, K. R., Briones, O., & Pérez-García, B. (2015). Spore germination of three tree fern species in response to light, water potential, and canopy openness. *American Fern Journal*, 105(2), 59-72. <https://doi.org/10.1640/amfj-105-02-59-72.1>
- Ruiz Robleto, J. M. (1995). *Reproducción y propagación de algunas especies de helechos arborescentes* [Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala]. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/1330>
- Rünk, K., & Zobel, M. (2009). Differences in post-emergence growth of three fern species could help explain their varying local abundance. *American Fern Journal*, 99(4), 307-322. <https://doi.org/10.1640/0002-8444-99.4.307>
- Salinas, M., Bahamondes, M., Muñoz, A., & Cartes, F. (2008). Resultados y lecciones en Producción comercial de helechos nativos. *Serie: Experiencia de Innovación Para El Emprendimiento Agrario*, 21, 28.
- Schneider, H. (2012). Evolutionary morphology of ferns (Monilophytes). *The Evolution of Plant Form*, 45, 115-140. <https://doi.org/10.1002/9781118305881.ch4>
- Seguí Simarro, J. M. (2010). *Biología y biotecnología reproductiva de las plantas*. Universitat Politècnica de València.
- Sharry, S. E., Adema, M., & Abedini, W. (Comp.). (2015). *Plantas de probeta: Manual para la propagación de plantas por cultivo de tejidos in vitro*. Universidad Nacional de la Plata.

- Shukla, S. P., & Khare, P. (2012). In-vitro mass multiplication of a threatened tree fern, *Cyathea spinulosa* Wall. ex Hook. *International Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 3(1), 15-23. <https://doi.org/10.13140/2.1.2282.8168>
- Stadtmüller, T. (1986). *Los bosques nublados en el trópico húmedo. Una revisión bibliográfica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape Ecology in theory and practice pattern and process*. Springer-Verlag.
- Véliz Pérez, M. E. (2008). Diversidad florística de Guatemala. En C. Azurdia Pérez, F. García Barrios & M. M. Ríos Palencia (Eds.), *Guatemala y su diversidad: Un enfoque histórico, cultural, biológico y económico* (Cap. 5; pp. 261-300). Consejo Nacional de Áreas Protegidas. https://sip.conap.gob.gt/wp-content/uploads/2021/05/Libro-Guatemala-y-su-Biodiversidad_2008.pdf
- Véliz Pérez, M. E., & Vargas Ponce, J. M. (2006). *Helechos arborescentes de Guatemala: Distribución, diversidad, usos y manejo*.

La Región Central de Guatemala, un Área Olvidada en el Estudio y Conservación del Quetzal (*Pharomachrus mocinno*)

The Central Region of Guatemala, a Forgotten Area in the Study and Conservation of the Resplendent Quetzal (Pharomachrus mocinno)

E. Daniel Tenez^{1*}, A. Lucía Grajeda¹, Claudia L. Burgos¹

Centro de Datos para la Conservación, Centro de Estudios Conservacionistas,
Universidad de San Carlos de Guatemala

*Autor al que se dirige la correspondencia: tenesguatemalensis@gmail.com

Recibido: 25 de octubre 2024 / Revisión: 11 de febrero 2025 / Aceptado: 19 de febrero 2025

Resumen

A pesar de que el quetzal (*Pharomachrus mocinno*) es una especie de importancia cultural y ecológica para los guatemaltecos, aún existen vacíos en su conocimiento y conservación. La distribución conocida en Guatemala incluye la región de Las Verapaces, la cadena volcánica occidental, áreas de los departamentos de Huehuetenango y Quiché, y las Reservas de Biosfera Sierra de las Minas y Trifinio-Fraternidad. Aunque históricamente su presencia se extendía a la región central del país, en los volcanes de Fuego y de Agua, la falta de registros recientes ha generado incertidumbre sobre su persistencia en los remanentes de bosques nubosos de esta zona. Por esta razón, la región ha permanecido olvidada en el estudio y conservación del quetzal por más de 150 años. Revisamos la información disponible y consideramos que la situación del quetzal en la región central del país es poco conocida, debido a la falta de registros verificados en los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez, Escuintla y Guatemala. Sin embargo, avistamientos recientes en el volcán de Agua y en áreas aledañas a la ciudad de Antigua Guatemala confirman la presencia del quetzal en la región central. Estos hallazgos resaltan la importancia de los bosques nubosos del área como hábitat clave. Además, evidencian la necesidad urgente de investigar más a fondo la región y establecer medidas de protección más eficaces para la especie. La conservación de estos ecosistemas no solo es crucial para garantizar la supervivencia del quetzal, sino también para proteger la biodiversidad en general y la conectividad de los bosques. La importancia biológica de esta región está amenazada por la pérdida de hábitat, los cambios en el uso del suelo, la deforestación, los incendios forestales y los efectos del cambio climático.

Palabras clave: Trogoniformes, distribución histórica y potencial, bosques nubosos, cadena volcánica central, conservación biológica

Abstract

Despite the fact that the Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) is a species of cultural and ecological importance for Guatemalans, there are still gaps in its knowledge and conservation. The known distribution in Guatemala includes the region of Las Verapaces, the western volcanic chain, areas of the departments of Huehuetenango and Quiché, and the Biosphere Reserves of Sierra de las Minas and Trifinio-Fraternidad. Although historically its presence extended to the central region of the country, in the Fuego and Agua volcanoes, the lack of recent records has created uncertainty about its persistence in the remaining cloud forests of this area. For this reason, the region has remained forgotten in the study and conservation of the Resplendent Quetzal for more than 150 years. We reviewed the available information and consider that the situation of the Resplendent Quetzal in the central region of the country is little known, due to the lack of verified records in the departments of Chimaltenango, Sacatepéquez, Escuintla and Guatemala. However, recent sightings on the Agua volcano and in areas around the city of Antigua Guatemala confirm the presence of the Resplendent Quetzal in the central region. These findings highlight the importance of the area's cloud forests as a key habitat. They also show the urgent need to further investigate the region and establish more effective protection measures for the species. The conservation of these ecosystems is not only crucial to ensure the survival of the Resplendent Quetzal, but also to protect biodiversity in general and the connectivity of forests. The biological importance of this region is threatened by habitat loss, changes in land use, deforestation, forest fires, and the effects of climate change.

Keywords: Trogoniformes, historical and potential distribution, cloud forests, central volcanic chain, biological conservation



Introducción

El quetzal (*Pharomachrus mocinno*) es una especie de importancia cultural dentro del patrimonio natural de los guatemaltecos, ya que representa un vínculo de pertenencia por ser el ave símbolo (Tenez, 2022). Se considera un orgullo nacional, presente en la historia de Guatemala, así como una especie carismática y emblemática para la conservación biológica en el país (Schulz & Thiemer-Sachse, 2021). Además, es una especie muy valorada por el turismo de observación de aves debido a su belleza (Burgos et al., 2008). Este aspecto también ha sido reconocido desde un enfoque evolutivo, de selección sexual y de percepción de la belleza. Los ornamentos del quetzal, como su coloración y características del plumaje, constituyen un claro ejemplo de cómo los rasgos sexuales secundarios del macho funcionan para la atracción (Mendelson & Ryan, 2023).

El quetzal se considera una especie sombrilla, pues las estrategias para su conservación favorecen a las demás especies y servicios ecosistémicos de los bosques nubosos donde habita (Schulz & Thiemer-Sachse, 2021). A nivel global, el quetzal se clasifica como una especie Casi Amenazada (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2024). Además, en la convención mundial que protege a las especies amenazadas del comercio internacional, el quetzal se encuentra en el Apéndice I, el cual prohíbe totalmente el comercio de especies en peligro de extinción (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres [CITES], 2024). A nivel nacional, el quetzal se clasifica como Vulnerable (Categoría 3), que corresponde a la categorización menos crítica de la Lista de Especies Amenazadas de Guatemala (Consejo Nacional de Áreas Protegidas [CONAP], 2022). Por otro lado, debido a la importancia cultural y ecológica que esta especie representa, en 2020 se aprobó oficialmente la Estrategia Nacional para la Conservación del Quetzal y su Hábitat en Guatemala (Centro Universitario de Zacapa de la Universidad de San Carlos de Guatemala [CUNZAC-USAC] & CONAP, 2020).

La distribución conocida del quetzal en Guatemala coincide con cuatro regiones identificadas en la estrategia nacional como prioritarias para la conservación de la especie. Estas regiones fueron definidas con base en registros recientes en 48 localidades del país, las cuales incluyen: (a) las tierras altas de Las Verapaces, en el Corredor Biológico del Bosque Nuboso y en otras serranías de los departamentos de Alta

Verapaz y Baja Verapaz; (b) la región de los departamentos de Quiché y Huehuetenango, específicamente en Cerro El Amay y Santa Cruz Barillas; (c) la región de oriente, que abarca los departamentos de El Progreso, Zacapa y Chiquimula, en las Reservas de Biosfera Sierra de las Minas y Trifinio-Fraternidad; y (d) la cadena volcánica, principalmente en la región occidental en los volcanes de los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Suchitepéquez y Sololá. También se menciona una quinta región constituida por los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez y Guatemala, denominada región central, la cual no fue considerada prioritaria debido a que no cuenta con registros recientes (CUNZAC-USAC & CONAP, 2020). En este ensayo se incluye al departamento de Escuintla en la región central, y a los volcanes localizados dentro de la región se les denomina cadena volcánica central.

Según los mapas de distribución potencial, el quetzal podría habitar en esta parte del país (Fagan & Komar, 2016; Vallely & Dyer, 2018), especialmente porque en la región central coinciden bosques nubosos de diferentes áreas. En los volcanes de Agua, de Fuego, Acatenango y Pacaya, existen bosques nubosos característicos de la cadena volcánica occidental. En ciertas áreas de los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez y Guatemala (en el Cerro Alux), los bosques nubosos están asociados a los del altiplano central. Además, en el departamento de Guatemala, hay bosques nubosos propios de la región volcánica y montañosa del suroriente, así como del área colindante con el departamento de Jalapa (Dix et al., 2023).

A pesar de la existencia de bosques nubosos en la región central, se desconoce la situación del quetzal y su hábitat en esta parte de su rango geográfico. La distribución potencial en esta región fue establecida por la existencia de registros históricos, pero su actualización no ha sido posible debido a la falta de nuevos registros. Consideramos que durante más de 150 años, desde los últimos registros, la región ha permanecido olvidada en el estudio y conservación del quetzal. Sin embargo, registros recientes indican que el quetzal se distribuye actualmente en la región central de Guatemala, lo cual abre nuevas oportunidades de investigación y protección.

Aunque a nivel nacional se reconoce el valor de esta especie, aún existen vacíos en su conocimiento. Hace falta información básica, como verificar la presencia del quetzal en las áreas de distribución histórica y potencial. Para ello, la estrategia nacional tiene como acción prioritaria establecer la distribución y el estado

de las poblaciones de quetzal en todo el país, así como analizar los patrones y factores que afectan dicha distribución (CUNZAC-USAC & CONAP, 2020). En ese sentido, vemos necesario recopilar, analizar y discutir la información sobre la distribución del quetzal en los bosques nubosos de la región central, con el objetivo de identificar los sitios históricos y actuales donde se ha registrado al quetzal, así como las áreas con alto potencial de distribución. Lo cual permite proponer esfuerzos de investigación y conservación en esta región que ha permanecido poco estudiada.

Contenido

Consideramos que el estudio de la distribución del quetzal en la región central de Guatemala ha estado olvidado según las prioridades de investigación de la especie. Esto lo comprueba la escasa información al respecto, que se limita a registros históricos y literatura gris, así como a registros anecdóticos que indican la posible presencia del quetzal de acuerdo a testimonios, pero que carecen de verificación. Sin embargo, existen registros fotográficos recientes que confirman la presencia del quetzal en esta región. La información revisada hace referencia principalmente a los volcanes de Agua (3,776 msnm), de Fuego (3,763 msnm) y Acatenango (3,976 msnm), que abarcan regiones de los departamentos de Sacatepéquez, Chimaltenango y Escuintla.

Registros Históricos

Se sabe que durante la época colonial el quetzal era una especie muy conocida en la región central de Guatemala, específicamente en el volcán de Agua, el cual proveía recursos naturales a las primeras ciudades del país, hoy conocidas como Ciudad Vieja y Antigua Guatemala, en el departamento de Sacatepéquez. En el documento histórico “Recordación Florida” escrito en 1690, se menciona la presencia del quetzal en el volcán de Agua y el uso de sus plumas como elementos decorativos durante el siglo XVII (Fuentes y Guzmán, 1690).

Posteriormente, en la enciclopedia de historia natural denominada *Biología Centrali-Americana*, escrita entre los siglos XIX y XX, aparece la distribución del quetzal en Guatemala. Incluía la región de Las Verapaces, los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango y Quiché, y la región central. Específicamente, en la región central se indica la presencia del quetzal

en la franja de bosque mixto ubicado a más de 2,000 m de altitud en el volcán de Agua y en el volcán de Fuego. Además, se menciona la colecta de especímenes de quetzal en ambos volcanes (Salvin & Godman, 1879-1904; Griscom, 1932). Uno de estos quetzales se encuentra en el museo *Naturalis Biodiversity Center* de Países Bajos. Se trata de una hembra colectada por O. Salvin en 1861, que tiene como localidad de colecta al volcán de Fuego (Kamminga & Creuwels, 2024). Según sus coordenadas, el punto corresponde a una región entre los volcanes adyacentes de Fuego y Acatenango, en el lado del departamento de Sacatepéquez. Es decir, que probablemente la distribución del quetzal en esa época también abarcaba al volcán Acatenango.

Por último, en un estudio realizado a mediados del siglo pasado, se destacó la presencia de una extensa y densa franja de bosque montano latifoliado en la parte media de los volcanes de Agua, de Fuego y Acatenango. En esta franja, potencialmente podría distribuirse el pavo de cacho (*Oreophasis derbianus*), que junto con la cayaya (*Penelopina nigra*) son aves endémicas de las Tierras Altas del Norte de Centroamérica. Se indica que al proteger los bosques donde habita el pavo de cacho en Guatemala, también se estaría protegiendo a la cayaya y al quetzal, ya que comparten el mismo hábitat (Andrle, 1967). Sin embargo, no queda claro si el quetzal fue reportado en estos volcanes.

Consideramos que los registros de más de 150 años de antigüedad, documentados en los volcanes de Agua y de Fuego, continúan siendo utilizados para establecer el límite más al este de la distribución potencial del quetzal en la cadena volcánica de Guatemala, ya que no hay registros en los volcanes del oriente del país. Llama la atención que, al parecer, en todo este tiempo no ha habido nuevos registros en la región central. Es decir, que la información sobre la distribución potencial del quetzal en esta región, basada solamente en datos históricos, está desactualizada.

Distribución Potencial

Consideramos al departamento de Chimaltenango, como el menos conocido en la distribución potencial del quetzal en la región central. Esto a pesar de la existencia de bosques nubosos donde podría hallarse la especie. Por lo que resulta interesante el hecho de que estos bosques generalmente no sean mencionados a nivel nacional como áreas potenciales para el quetzal y, por lo tanto, tampoco sean prioritarios para ser conservados a través de áreas protegidas y otros mecanismos.

Los bosques del municipio de San Miguel Pochuta fueron incluidos en un estudio para priorizar áreas de conservación de bosques nubosos en Guatemala (Díaz Reyes, 2022). Aunque no existen registros confirmados, se señala que el quetzal habita en estos bosques nubosos (Consejo Municipal de Desarrollo del Municipio de San Miguel Pochuta y Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia [SEGEPLAN], 2010). Específicamente, se ha considerado la ocurrencia potencial del quetzal en los bosques de la localidad conocida como Comunidad Candelaria (Centro de Datos para la Conservación del Centro de Estudios Conservacionistas [CDC-CECON], 2018). Asimismo, según lo informado por un vecino de San Miguel Pochuta, se sabe de avistamientos de quetzal y de pavo de cacho en las montañas de dicha comunidad, colindantes con el municipio de Patzún (C. López-Figueroa, comunicación personal, 27 de septiembre de 2024). Por lo tanto, estas montañas constituyen un sitio prioritario para corroborar la presencia del quetzal.

Por otro lado, entre los municipios de Patzicía y Patzún se ubica el bosque Balam Juyú, considerado extenso y de importancia para la conectividad natural, donde se ha reportado a la cayaya (Martínez & Alfaro, 2012). Esta especie podría ser un indicador de la presencia del quetzal, ya que pueden distribuirse en el mismo hábitat.

Por último, ciertas regiones de los municipios de San Miguel Pochuta y Patzún forman parte de un sector de bosques predominantemente latifoliados con presencia de coníferas, ubicados entre los volcanes del Lago de Atitlán, en Sololá, y la cadena volcánica central, por lo que se consideran bosques de importancia para la conectividad (CONAP, 2007). Estos municipios junto a áreas de Patzicía, San Pedro Yepocapa y Acatenango fueron incluidos en la propuesta de un corredor biocultural y de desarrollo sostenible denominado Zunil-Atitlán-Balam Juyú, diseñado para la conservación y recuperación de los bosques de este sector (Secaira, 2012).

La presencia del quetzal en los bosques nubosos de Chimaltenango es altamente probable, ya que están ubicados entre dos áreas de distribución de la especie: los volcanes de Sololá al oeste y los volcanes de Agua y de Fuego al este. Estos bosques requieren atención, pues podrían estar sirviendo como un corredor biológico. En este departamento, es necesario corroborar la presencia del quetzal o evaluar la potencialidad de estas áreas para albergar a la especie. Para ello, se debe establecer la disponibilidad y calidad del hábitat, de acuerdo a los re-

querimientos específicos de altitud, humedad, recursos alimenticios y de anidación, entre otros.

Distribución Actual

A pesar de que no existían registros recientes, todavía no se consideraba al quetzal como una especie extirpada de la región de los volcanes de Agua, de Fuego y Acatenango (Figura 1). Más bien, se consideraba una especie con posible presencia, debido a los remanentes boscosos que persisten. Seguramente, la falta de investigaciones o de avistamientos de quetzales se debe al difícil acceso a estos bosques en los volcanes, y al interés por estudiar otras áreas del país.

En la ladera sur del volcán de Agua, hacia la vertiente del Pacífico en el departamento de Escuintla, existe una cobertura forestal densa, con poca intervención humana y con presencia de especies como la cayaya (González, 2021). La cual también ha sido reportada en un estudio técnico de categorización del volcán (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2022a). Esta especie constituye un indicio para sospechar la presencia del quetzal. Además, en la ladera norte del volcán de Agua, en el departamento de Sacatepéquez, existen bosques nubosos a más de 2,800 msnm (Figura 2). Según información anecdótica, el fotógrafo y ambientalista Thor Janson (†) observó poblaciones de quetzales en tres localidades de esta parte del volcán en 2012 (J. Rivera, comunicación personal, 23 de septiembre de 2024). Aunque no fue posible localizar evidencias, esta información constituye un antecedente reciente sobre la presencia de la especie.

Fue hasta diciembre de 2023 cuando se confirmó la presencia del quetzal en el volcán de Agua. A través de noticias nacionales, se dieron a conocer fotografías y videos del avistamiento de un grupo de cuatro machos y una hembra (Diario de Centroamérica, 2023; Reyes & Pérez, 2023). Si bien no se precisó la localidad exacta donde se observaron los quetzales, este importante hallazgo permite inferir que aún existen poblaciones de la especie en el volcán, lo que implica acciones urgentes de investigación y conservación.

Es por ello que deben realizarse expediciones al volcán de Agua en diferentes épocas del año, con el fin de obtener registros completos georreferenciados, con información de altitud, fechas y horas exactas. Los cuales deben estar disponibles en plataformas diseñadas para el manejo y digitalización de datos de la biodiversidad nacional, como el Portal de Biodiversidad

Figura 1

Volcanes de Agua, de Fuego y Acatenango



Nota. El volcán de Agua (izquierda) y los volcanes de Fuego y Acatenango (derecha) vistos desde la ciudad de Antigua Guatemala, Sacatepéquez. Fotografía: © E. Daniel Tenez.

de Guatemala (<https://biodiversidad.gt/portal/>). Estos datos son de vital importancia para la comunidad científica y las entidades encargadas de la conservación y manejo de la vida silvestre en el país. Asimismo, se debe determinar si el quetzal corresponde a una especie rara o abundante en el área, y evaluar las condiciones del hábitat, entre otros estudios. Los hallazgos deben presentarse en publicaciones científicas.

A través de registros de ciencia ciudadana depositados en la plataforma eBird (<https://ebird.org/home>), también se reportan avistamientos de quetzal en la región central del país. Por ejemplo, en las montañas al norte de la ciudad de Antigua Guatemala, en la Finca Filadelfia, Sacatepéquez, fue fotografiado un quetzal macho solitario (Figura 3, <https://ebird.org/checklist/S29597677>). El cual fue observado en seis ocasiones durante el mes de mayo de 2016, en un bosque nuboso entre 2,100 y 2,500 msnm.

Aunque no se registraron más individuos, la fecha de observación de este registro podría correspon-

der a la época reproductiva de la especie, que abarca de enero a junio. Mientras que de julio a diciembre, el quetzal realiza migraciones altitudinales, las cuales pueden comenzar a finales de mayo (Solórzano, 2010). También podría ser que este individuo se estuviera desplazando desde otras áreas vecinas, sin implicar movimientos altitudinales.

Por ello, es necesario determinar si el parche boscoso posee suficiente tamaño y conectividad con otros bosques, principalmente porque este sitio montañoso se ubica en el lado opuesto del volcán de Agua y está separado por la ciudad. Es decir, este hallazgo es bastante relevante ya que podría constituir otro punto de distribución aislado, en una zona montañosa distinta a la región de los volcanes. Estos registros en la Finca Filadelfia podrían considerarse puntuales, ya que no se han reportado más avistamientos continuos y recientes. Por lo tanto, es urgente realizar estudios de campo para verificar la presencia del quetzal como una especie establecida en estas montañas.

Figura 2*Bosque nuboso en el volcán de Agua*

Nota. Bosque nuboso como hábitat potencial para el quetzal (*Pharomachrus mocinno*) a 2,860 msnm en la ladera norte del volcán de Agua, octubre de 2024. Fotografía: © Ana Silvia Martínez.

En el volcán Acatenango, existe un registro de ciencia ciudadana realizado en 2018, que debe ser validado ya que no presenta respaldo fotográfico, y no queda claro si el quetzal fue observado o solamente escuchado. En un estudio técnico para la categorización de este volcán, además de la cayaya también se incluye al quetzal (MARN, 2022b). Al parecer, el registro del quetzal corresponde al mismo de ciencia ciudadana.

Respecto al volcán de Fuego, en otro estudio técnico de categorización se menciona el avistamiento reciente del quetzal en el municipio de San Pedro Yepocapa, Chimaltenango (MARN, 2022c). Sin embargo, hacen falta registros completos, con fechas y puntos georreferenciados. Por lo tanto, esta área también debe incluirse en los sitios de distribución potencial que requieren verificación de campo.

Por último, en el departamento de Guatemala se han reportado cuatro avistamientos de quetzales. Sin

Figura 3*Quetzal macho en Finca Filadelfia, Sacatepéquez*

Nota. Quetzal macho (*Pharomachrus mocinno*) observado en Finca Filadelfia, Sacatepéquez, el 12 de mayo de 2016. Fotografía: © Vittorio Cattelan, Cornell Lab of Ornithology, Macaulay Library

embargo, se descartó que estuvieran asociados a una distribución natural, ya que fueron hallados en hábitats urbanos y fuera del área de distribución potencial. Asimismo, consideramos que las áreas boscosas en los barrancos y regiones montañosas de la ciudad y sus alrededores no cumplen con los requerimientos específicos de hábitat y alimentación de la especie.

En la Ciudad de Guatemala, entre 2009 y 2018 se reportaron tres individuos de quetzal que fueron considerados producto de la cacería y el tráfico ilegal de especies silvestres (CUNZAC-USAC & CONAP, 2020). En el año 2009, se registró una hembra en el Jardín Botánico CECON-USAC y sus alrededores en la zona 10, la cual fue observada por dos de nosotros (C. L. Burgos & E. D. Tenez). A pesar de no estar en su hábitat natural, permaneció en el área casi tres semanas. Probablemente, este caso se trató de un individuo liberado intencionalmente en dicho jardín. En 2013, otra hembra fue encontrada en unas bodegas en la zona 12 (Prensa Libre Oficial, 2013), donde A. L. Grajeda participó en el rescate de este individuo, que probablemente había escapado del cautiverio. Mientras

que en 2018, fue encontrado un quetzal macho en las instalaciones de un centro comercial en la zona 16.

Existe un registro de ciencia ciudadana de 2014 de un quetzal macho fotografiado en el municipio de Santa Catarina Pinula, al este de la ciudad capital. Al parecer, también podría tratarse de un individuo liberado en estos bosques rodeados por áreas urbanas. Además, en esta región del país no aparecen registros históricos o potenciales y no tiene relación con la distribución más cercana en Sacatepéquez.

Conservación de la Especie

En Guatemala, el quetzal es una especie escasa con distribución restringida principalmente a un tipo de bosque específico, el bosque nuboso, que a su vez posee una distribución muy limitada en áreas montañosas. A nivel mundial, el quetzal se distribuye únicamente desde el sur de México hasta el oeste de Panamá (Fagan & Komar, 2016; Valley & Dyer, 2018). Es decir, es una especie propia de Mesoamérica, pero no constituye una especie endémica, ya que el área de su distribución es mayor a los 50,000 km², que es el criterio para definir aves con rango restringido (Eisermann & Avendaño, 2009).

Sin embargo, para el quetzal se reconocen dos subespecies cuya distribución está separada por la barrera biogeográfica de las tierras bajas en la Depresión de Nicaragua. Es decir, existe una subespecie en la región norte de Mesoamérica y otra en la región sur. Desde el sur de México hasta el norte de Nicaragua se distribuye la subespecie *P. m. mocinno*, mientras que entre Costa Rica y Panamá se encuentra *P. m. costaricensis*. Estas poblaciones aisladas presentan marcadas diferencias genéticas y morfométricas entre sí. Por ejemplo, las coberturas de la cola del macho son significativamente más largas en la subespecie del norte (Solórzano & Oyama, 2010; Schulz & Eisermann, 2017). Asimismo, existen diferencias bioacústicas en sus vocalizaciones (Bolaños-Sittler et al., 2019). Estos estudios sugieren que las subespecies del quetzal podrían ser dos especies distintas.

Esta división tendría implicaciones para la conservación de la especie a nivel internacional. Es probable que las poblaciones del norte requieran medidas de protección más rigurosas, incluso una modificación en su categoría de conservación, debido a diferencias en el estado de la especie y en las condiciones del hábitat entre ambas regiones (Solórzano & Oyama, 2010; Bolaños-Sittler et al., 2019). Por ejemplo, los bosques

nubosos en el norte de Centroamérica están cada vez más amenazados por el cambio de uso del suelo para la agricultura, asociado al rápido crecimiento de la población humana, por lo que requieren medidas de conservación urgentes (Schulz & Eisermann, 2017).

Además, al reducirse el área de la distribución original, se podría evaluar incluir a la especie del norte como endémica de las Tierras Altas del Norte de Centroamérica, región que abarca desde el sur de México hasta el norte de Nicaragua. Sin embargo, aún se requieren más estudios para establecer si estas subespecies constituyen dos especies diferentes. Mientras tanto, una categoría de protección más alta en Guatemala permitiría preservar la diversidad genética y las poblaciones de la subespecie *P. m. mocinno*.

Consideramos necesario evaluar una recategorización del quetzal en la Lista Nacional de Especies Amenazadas, es decir, cambiar de Vulnerable (Categoría 3) a En Peligro (Categoría 2). Actualmente, el quetzal se encuentra en la misma categoría que otras aves más comunes y con menor restricción de hábitat, incluidas las especies cinegéticas. Por lo tanto, se debería incluir al quetzal en la categoría superior inmediata que brinda mayor protección. Para ello, se deben tomar en cuenta otros aspectos propios de la especie, como la importancia nacional que representa, los casos de tráfico ilegal de individuos y plumas, pero principalmente la destrucción de los limitados bosques nubosos y otros hábitats donde se distribuye. En el caso del volcán de Agua, los bosques que habían permanecido casi intactos podrían estar desapareciendo actualmente por los incendios forestales.

En Guatemala se han identificado 21 áreas de importancia para la conservación de las aves. Una de ellas, denominada “Antigua Guatemala”, abarca partes de los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez y Guatemala. Esta área se caracteriza por la presencia de especies amenazadas a nivel mundial, especies endémicas de las Tierras Altas del Norte de Centroamérica y especies que están restringidas a los biomas de montaña (Eisermann & Avendaño, 2009). La distribución potencial del quetzal en la región central del país coincide con esta área de importancia para las aves, por lo que su presencia confirmada puede contribuir a fortalecer dicha iniciativa a través de actividades de investigación o de educación ambiental. Asimismo, el quetzal resalta aún más la importancia biológica de la región central de Guatemala y justifica la urgente necesidad de conservación.

Las áreas con presencia de quetzal, como el volcán de Agua, deben contar con planes de manejo actual-

lizados para analizar las actividades permitidas, entre ellas el turismo de naturaleza y de observación de aves. Esta actividad mal manejada podría convertirse en una amenaza para los bosques inaccesibles de los volcanes, es decir, para el hábitat del quetzal. Asimismo, podría alterar el comportamiento de la especie que ha permanecido aislada en estos bosques. En caso de ser permitida, debe ser regulada, responsable y sostenible. Debe realizarse únicamente en determinados sitios que cuenten con estudios de capacidad de carga. Además, debe generar la menor intervención posible, asegurando la conservación de los bosques, de la especie y la seguridad de los turistas debido a las características del terreno. En el volcán Acatenango, se deben evaluar los efectos del turismo sobre el bosque nuboso.

Conservación del Hábitat

Al igual que la investigación, consideramos que la conservación de los hábitats del quetzal en la región central de Guatemala ha estado relegada. Esto se debe a que ambas actividades se han centrado en otras áreas del país, como Las Verapaces o la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas. Por lo tanto, es urgente iniciar esfuerzos de conservación efectivos en las áreas de la región central con presencia confirmada o altamente potencial.

En la cadena volcánica central, el quetzal se distribuye solamente en una franja específica de bosque nuboso en la parte media. Es decir, no se ha reportado en las partes cercanas a las cumbres ni en las áreas a menor altitud donde existen cultivos. Para los volcanes de Fuego y Acatenango, considerados un complejo volcánico, las masas boscosas continuas podrían estar funcionando como un corredor biológico (MARN, 2022c).

Además de los bosques nubosos, el quetzal también utiliza bosques de pino-encino en ciertas épocas del año. Esto se debe a que migra altitudinalmente desde los sitios de anidación, ubicados en las partes altas con bosques nubosos, hacia elevaciones menores con otros tipos de hábitats, como bosques de pino-encino y de galería (Paiz, 1996; Solórzano, 2010). En Guatemala, en la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas y en el Biotopo Universitario para la Conservación del Quetzal Mario Dary Rivera, se han documentado los movimientos estacionales y altitudinales que el quetzal recorre dentro y fuera de estas áreas protegidas (Paiz, 1996; Bustamante-Castillo et al., 2013).

Los aspectos biológicos y los requerimientos de hábitat de la especie deben ser tomados en cuenta

para definir las áreas de conservación de la especie en los volcanes, ya que al proteger solamente la parte más alta, no se estarían protegiendo los hábitats utilizados por el quetzal. Además, el avance de la frontera agrícola hacia la parte media podría estar afectando la viabilidad de la especie. En estos volcanes, es necesario identificar y proteger los bosques que el quetzal utiliza durante las migraciones altitudinales a lo largo del año.

Consideramos que los bosques nubosos en los volcanes se han conservado principalmente por el difícil acceso a los mismos, debido a las pronunciadas pendientes, y no tanto por las acciones o la presencia institucional. Estos bosques han permitido la existencia de poblaciones de quetzales en el volcán de Agua durante más de 150 años, desde sus registros históricos. Además de los bosques nubosos, los bosques mixtos también son esenciales para la presencia de especies amenazadas. Por ejemplo, en el año 2022 fue redescubierta una especie de lagartija arborícola endémica del volcán de Agua (*Abronia anzuetoi*) en bosques de cipreses y encinos, luego de casi cincuenta años sin registros (Reyes et al., 2022). Por otro lado, felinos como el puma (*Puma concolor*) y el tigrillo (*Leopardus wiedii*) han sido registrados en el volcán (González, 2021; Reyes & Pérez, 2023).

Estos hallazgos son indicadores de la importancia biológica del volcán de Agua, la cual no se ha estudiado detalladamente y se encuentra en peligro, principalmente por el cambio del uso del suelo, la deforestación y los incendios forestales. Recientemente, estos incendios han cobrado más importancia. En la época seca de 2024, entre febrero y mayo, el volcán de Agua registró uno de los incendios más extensos que han ocurrido en el lugar (Figura 4), ya que abarcó 600 ha, incluido bosque nuboso, y duró dos meses y medio con diferentes intensidades (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala [INSIVUMEH], 2024; Ola, 2024). Debido a que el volcán de Agua se encuentra entre dos departamentos, Sacatepéquez en el norte y Escuintla en el sur, el manejo y protección del sitio debe ser coordinado, pues al parecer, el quetzal está utilizando áreas en las laderas norte y sur del volcán.

Como parte de las primeras políticas de conservación del país, fueron creadas las Zonas de Veda Definitiva, que incluyeron a todos los conos volcánicos. En estas zonas, estaba prohibido realizar descombro con fines agropecuarios y explotaciones forestales hasta cierto nivel de pendiente en los volcanes. Además, se debía favorecer la restauración de sus bosques a través de la regeneración natural (Ministerio de Agricultura,

Figura 4

Área afectada por el incendio forestal de 2024 en el Volcán de Agua



Nota. Estado de la parte media de la ladera norte del volcán de Agua en julio de 2024, afectada por el incendio forestal de la época seca. Fotografía: © Rosa Alejandra Roldán.

1956). Es decir, se suponía que en estas zonas había una máxima protección y casi todas las actividades antrópicas estaban prohibidas, ya que su objetivo principal era conservar la biodiversidad y los ecosistemas en su estado más natural. Sin embargo, a lo largo de todos estos años no se ha logrado cumplir con dicho objetivo, y los ecosistemas dentro de las Zonas de Veda Definitiva han experimentado una transformación y fragmentación progresiva. Es probable que el ecosistema de bosque nuboso también se haya visto afectado, al igual que su fauna asociada, incluido el quetzal.

Actualmente, se están promoviendo iniciativas y estudios técnicos para que los conos volcánicos dejen de ser Zonas de Veda Definitiva y categorizarlos

como Reservas de Uso Múltiple, que es una categoría más flexible, ya que permite actividades productivas (CONAP, 2016). Sin embargo, al introducir normas más permisivas para la extracción de recursos naturales y la existencia de la propiedad privada, se podría favorecer un sistema idóneo para diferentes actividades socioeconómicas, que a largo plazo tendrían efectos negativos en la biodiversidad de dichas áreas. Por lo tanto, consideramos más apropiado establecer una categoría con objetivos de conservación más estrictos y eficientes para proteger de mejor manera los volcanes, especialmente por la presencia del quetzal.

Respecto a los bosques nubosos de Chimalteango, es recomendable crear áreas protegidas para

su protección. Además, se deben identificar y restaurar áreas específicas que pudieran estar sirviendo como corredores biológicos para el quetzal. En general, en Guatemala es necesario apoyar y fortalecer la protección legal, la conservación y el estudio de todos los ecosistemas naturales que contienen hábitats y refugios para el quetzal, incluidos los sitios donde su presencia es altamente potencial.

Conclusiones

Los registros recientes del quetzal en el departamento de Sacatepéquez sirven para actualizar la distribución de la especie en Guatemala. Estos datos permiten definir de manera más precisa los mapas y modelos predictivos de distribución potencial. Sin embargo, para establecer la distribución actual y futura del quetzal, también es necesario tomar en cuenta los efectos del cambio climático, ya que se pronostica la desaparición de muchas de las áreas de su distribución conocida en el territorio guatemalteco (González et al., 2022).

Si bien la información sobre la presencia del quetzal en la región central de Guatemala es limitada, los escasos reportes pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones y para definir sitios de búsqueda intensiva con el fin de corroborar la presencia de la especie. También es necesario evaluar la disponibilidad de hábitat y el estado de conservación de los parches de bosques nubosos para determinar si todos cumplen con los requerimientos específicos de la especie.

La región central de Guatemala ha permanecido olvidada en los esfuerzos de investigación y conservación del quetzal, hasta tal punto que la especie podría haberse considerado extinta localmente debido a la falta de registros por más de 150 años. Sin embargo, la presencia actual del quetzal en esta región debe tomarse como una nueva oportunidad para ejecutar acciones de conservación más efectivas, orientadas a la protección de la especie y los hábitats que utiliza.

Agradecimientos

Por su información a Carlos López Figueroa, Juan Rivera, Rocío Aldekoa, Milton Cabrera y Melisa Ojeda. Por las fotografías a Rosa Alejandra Roldán, Ana Silvia Martínez y Vittorio Cattelan. Por su colaboración en las gestiones para el uso de una fotografía a Vanessa Powell de Macaulay Library, Cornell Lab of Ornithology.

Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del documento: EDT, ALG y CLB

Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: EDT

Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: Todos los autores

Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: Todos los autores

Participación en análisis de datos, estructura y en la escritura del documento: Todos los autores

Materiales suplementarios

Este artículo no tiene archivos complementarios.

Referencias

- Andrle, R. F. (1967). The Horned Guan in Mexico and Guatemala. *The Condor*, 69(2), 93-109.
- Bolaños-Sittler, P., Sueur, J., Fuchs, J., & Aubin, T. (2019). Vocalisation of the rare and flagship species *Pharomachrus mocinno* (Aves: Trogonidae): Implications for its taxonomy, evolution and conservation. *Bioacoustics*, 29(6), 654-669. <https://doi.org/10.1080/09524622.2019.1647877>
- Burgos, C., Guzmán, F., Dalliès, C., & Mendizabal, G. (2008). *Observación del Quetzal en Guatemala*. Instituto Guatemalteco de Turismo.
- Bustamante-Castillo, M., Barrios-Izás, M. A., Méndez, C. A., Yurrita-Obiols, C. L., Morán-Villatoro, D., Ríos-Galvez, V., & Ranchos-Monterroso, L. (2013). *Evaluación de la población de quetzales (Pharomachrus mocinno de la Llave) del Biotopo para la Conservación del Quetzal y sus movimientos estacionales a través del paisaje*. (FODECYT No. 40-2009). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Centro de Datos para la Conservación del Centro de Estudios Conservacionistas. (2018). *Diagnóstico Ambiental de la Comunidad Candelaria, San Miguel Pochuta, Chimaltenango*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Centro Universitario de Zacapa de la Universidad de San Carlos de Guatemala & Consejo Nacional

- de Áreas Protegidas. (2020). *Estrategia de conservación del Quetzal (Pharomachrus mocinno mocinno) y su hábitat en Guatemala* (Publicación técnica No. 9-2020).
- Consejo Municipal de Desarrollo del Municipio de San Miguel Pochuta & Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. (2010). *Plan de Desarrollo San Miguel Pochuta, Chimaltenango, 2011-2025* (Serie: PDM SEGEPLAN, CM 408). Dirección de Planificación Territorial.
- Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2007). *Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán, 2007-2010*. (Documento técnico No. 56 04-2007).
- Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2016). *Ley de Áreas Protegidas y su Reglamento, Decreto No. 4-89 y sus Reformas, Decretos No. 18-89, 110-96 y 111-97 del Congreso de la República de Guatemala* (Documento técnico No. 18-2016).
- Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2022). *Lista de especies amenazadas de Guatemala* (Publicación técnica No. 02-2022).
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. (2024). *Apéndices I, II y III de la CITES*. <https://cites.org/esp/app/index.php>
- Diario de Centroamérica. (2023, 7 de diciembre). *El ave Quetzal es fotografiado por primera vez en cercanías a un volcán* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=kPENfkPw4HU>
- Díaz Reyes, A. M. (2022). *Priorización de áreas de conservación de bosques nubosos en base a un análisis multicriterio de las comunidades de Quercus* [Informe final de EPS, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://www.biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/Tesis/B309.pdf>
- Dix, M. A., Maldonado, M. L., Dix, M. W., Grajeda, A. L., & Barrios, S. (2023). Bosques nubosos de Guatemala: Biodiversidad, endemismo e importancia, con referencia especial a bromelias, orquídeas, herpetofauna, aves y mamíferos. En J. C. Schuster, J. Yoshimoto & J. M. Sierra (Eds.), *Biodiversidad de Guatemala* (Vol. 3, pp. 408-432). Universidad del Valle de Guatemala.
- Eisermann, K., & Avendaño, C. (2009). Conservation priority-setting in Guatemala through the identification of Important Bird Areas. En T. D. Rich, C. Arizmendi, D. W. Demarest & C. Thompson (Eds.), *Proceedings of the fourth international Partners in Flight conference* (pp. 315-327). Partners in Flight.
- Fagan, J., & Komar, O. (2016). *Peterson field guide to birds of Northern Central America*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Fuentes y Guzmán, F. A. (1690). *La Recordación Florida, discurso historial y demostración natural, material, militar y política del Reyno de Guatemala*. En J. Zaragoza & L. Navarro (Eds.) [1882]. Biblioteca de los Americanistas.
- González, B., Ortiz, M. J., & López, Z. (2022). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) en Guatemala a partir de modelamientos de nicho ecológico. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*, 44, 43-52.
- González, L. E. (2021). *Evaluación ecológica rápida en Finca El Zur, Escuintla, Guatemala*. [Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala]. <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/handle/123456789/4463>
- Griscom, L. (1932). Distribution of bird-life in Guatemala: A contribution to a study of the origin of Central American bird-life. *Bulletin American Museum of Natural History*, 64.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala. (2024). Evaluación rápida de amenazas por flujos de lodo post-incendio en el volcán de Agua. *Boletín Vulcanológico Especial Beagu* 55-2024. https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2024/09/Boletin_Especial_Volcan_Agua.pdf
- Kamminga, P., & Creuwels, J. (2024, 30 de septiembre). *Pharomachrus mocinno mocinno* Aves. [Conjunto de datos]. Naturalis Biodiversity Center (NL). Accesado vía GBIF.org <https://www.gbif.org/occurrence/2434045253>
- Martínez, D. E., & Alfaro, G. (2012). Nuevos registros y biodiversidad amenazada en dos bosques comunales de manejo indígena. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*, 24, 59-71.
- Mendelson, T. C., & Ryan, M. J. (2023). Sex and design in our evolutionary cousins: The perception of beauty in nature. *Metode Science Studies*

- Journal*, 13, 145-151. <https://doi.org/10.7203/metode.13.24202>
- Ministerio de Agricultura. (1956, 27 de junio). Decreto Presidencial 21 de junio 1956, Declaración de Parques Nacionales y Zonas de Veda Definitiva. *El Guatemalteco*, 71:1059.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2022a). *Estudio técnico para el proceso de categorización de la Zona de Veda Definitiva Volcán de Agua*. Proyecto Promoviendo Territorios Sostenibles y Resilientes en Paisajes de la Cadena Volcánica Central de Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2022b). *Estudio técnico para el proceso de categorización de la Zona de Veda Definitiva Volcán de Acatenango*. Proyecto Promoviendo Territorios Sostenibles y Resilientes en Paisajes de la Cadena Volcánica Central de Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2022c). *Estudio técnico para el proceso de categorización de la Zona de Veda Definitiva Volcán de Fuego*. Proyecto Promoviendo Territorios Sostenibles y Resilientes en Paisajes de la Cadena Volcánica Central de Guatemala.
- Ola, A. L. (2024, 15 de junio). Volcán de Agua: El recuento de los daños luego de 52 días de incendio. *Prensa Libre*. <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/volcan-de-agua-el-recuento-de-los-danos-luego-de-52-dias-de-incendio/>
- Paiz, M. C. (1996). *Migraciones estacionales del quetzal (Pharomachrus mocinno) en la región de la Sierra de las Minas, Guatemala y sus implicaciones para la conservación de la especie* [Tesis licenciatura inédita, Universidad del Valle de Guatemala].
- Prensa Libre Oficial. (2013, 27 de mayo). *Hallan quetzal hembra en una bodega* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=2EtFhDzQCjY>
- Reyes, G., Monzón, J., & Ariano-Sánchez, D. (2022). Rediscovery after 48 years and geographic range extension of *Abronia anzuetoi* (Campbell & Frost, 1993) (Squamata: Anguidae) from Agua Volcano, Guatemala. *Revista Latinoamericana de Herpetología*, 5(4), 108-111.
- Reyes, I., & Pérez, C. (2023, 6 de diciembre). Quetzales y otros animales silvestres vistos en el Volcán de Agua: Las imágenes, la iniciativa y el llamado de auxilio para proteger el lugar. *Prensa Libre*. <https://www.prensalibre.com/vida/escenario/quetzales-y-otros-animales-silvestres-vistos-en-el-volcan-de-agua-las-imagenes-la-iniciativa-y-el-llamado-de-auxilio-para-proteger-el-lugar/>
- Salvin, O., & Godman, F. D. (1879 - 1904). *Aves. Biología Centrali-Americana*, Vols. 1-4. Taylor & Francis.
- Secaira, E. (2012). *Corredor bio-cultural y de desarrollo sostenible Zunil-Atitlán-Balam Juyú, definición técnica y plan de manejo (2012-2022)*. Asociación Vivamos Mejor.
- Schulz U., & Eisermann, K. (2017). Morphometric differentiation between subspecies of Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno mocinno* and *P. m. costaricensis*) based on male uppertail-coverts. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, 137(4), 287-291. <https://doi.org/10.25226/bboc.v137i4.2017.a6>
- Schulz, U., & Thiemer-Sachse, U. (2021). *La vida del Quetzal en la historia del arte mesoamericano*. Hueber.
- Solórzano, S. (2010). La historia natural del quetzal y sus perspectivas en conservación. En M. A. Pérez-Farrera, C. Tejeda-Cruz, & E. Silva-Rivera (Eds.). *Los bosques mesófilos de montaña de Chiapas. Situación actual, diversidad y conservación* (pp. 227-268). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Solórzano, S., & Oyama, K. (2010). Morphometric and molecular differentiation between quetzal subspecies of *Pharomachrus mocinno* (Trogoniformes: Trogonidae). *Revista de Biología Tropical*, 58(1), 357-371.
- Tenez, E. D. (2022). Importancia del componente natural asociado al patrimonio cultural de Guatemala. *Antropología e Historia de Guatemala*, 4(2), 103-119.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2024, 28 de septiembre). *Pharomachrus mocinno, últimas evaluaciones: 2022 y 2016. (Versión 2024-1)*. The IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/species/22682727/221577625>
- Vallely, A. C., & Dyer, D. (2018). *Birds of Central America: Belize, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, and Panama*. Princeton University Press.

Océanos de oportunidades: Áreas Marinas Protegidas y su potencial en regiones económicamente vulnerables

Oceans of opportunity: Marine Protected Areas and their potential in economically vulnerable regions

Jenniffer Alejandrina García Dardón  *

Departamento de Estudios del posgrado, Centro de Estudios del Mar y Acuicultura,
Universidad de San Carlos de Guatemala

*Autor al que se dirige la correspondencia: Jenny-garcia92@hotmail.com

Recibido: 18 de julio 2024 / Revisión: 13 de septiembre 2024 / Aceptado: 18 de noviembre 2024

Resumen

El establecimiento de Áreas Marinas Protegidas (AMP) se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras para mitigar la sobreexplotación de los recursos marinos y preservar la biodiversidad en un contexto global de cambio climático y degradación de ecosistemas. Sin embargo, el éxito de las AMP no solo radica en la delimitación de espacios geográficos para la conservación, sino en la comprensión y gestión de la compleja relación entre los actores involucrados. En zonas económicamente vulnerables, la tensión entre las necesidades de las comunidades pesqueras y los objetivos de conservación puede determinar el destino de estas iniciativas. A pesar de los beneficios reconocidos de las AMP, como el aumento de la resiliencia de los ecosistemas marinos, la mejora en la biomasa pesquera y la mitigación de prácticas no sostenibles, su implementación enfrenta desafíos significativos. Estos incluyen la percepción de exclusión por parte de los pescadores, quienes, a menudo, ven en las AMP una amenaza directa a su medio de vida. La falta de una planificación inclusiva y de un abordaje participativo ha resultado en una resistencia que compromete la eficacia de estas áreas. En este ensayo, se analizarán los efectos tanto positivos como negativos de las AMP, destacando la importancia de integrar las voces de las comunidades desde el inicio y proponiendo un marco para la participación comunitaria que optimice los resultados de conservación y desarrollo socioeconómico. Asimismo, se plantearán recomendaciones para la correcta implementación de AMP y una hoja de ruta para la participación activa y continua de los actores clave.

Palabras clave: Áreas Marinas Protegidas, AMP's, Gestión integrada costera, comunidades pesqueras, trabajo intersectorial, participación inclusiva

Abstract

The establishment of Marine Protected Areas (MPAs) has become one of the most promising strategies to mitigate the overexploitation of marine resources and preserve biodiversity in a global context marked by climate change and ecosystem degradation. However, the success of MPAs depends not only on defining geographic spaces for conservation but also on understanding and managing the complex relationships among the involved stakeholders. In economically vulnerable regions, the tension between the needs of fishing communities and conservation objectives can dictate the outcome of these initiatives. Despite the recognized benefits of MPAs, such as increased ecosystem resilience, enhanced fish biomass, and the mitigation of unsustainable practices, their implementation faces significant challenges. These include the perception of exclusion by fishers, who often view MPAs as a direct threat to their livelihoods. The lack of inclusive planning and participatory approaches has resulted in resistance that undermines the effectiveness of these areas. This essay will analyze both the positive and negative effects of MPAs, highlighting the importance of integrating community voices from the outset and proposing a framework for community participation that optimizes conservation and socio-economic development outcomes. Moreover, recommendations for the proper implementation of MPAs will be discussed, along with a roadmap for the active and continuous involvement of key stakeholders.

Keywords: Marine Protected Areas, MPAs, Integrated coastal management, fishing communities, intersectoral work, inclusive participation



Océanos de oportunidades: Áreas Marinas Protegidas y su potencial en regiones económicamente vulnerables

Introducción

Son múltiples los factores que han alterado a las comunidades ícticas de importancia comercial, a nivel mundial. Entre estos factores se encuentran: el cambio climático (Ramos-Esplá et al., 2004), la sobrepoblación, la sobrepesca (Hutchings & Myers, 1994; Lindholm et al., 2001), falta de regulaciones y ordenamiento pesquero (Sumaila et al., 2000), escasez de proteína de otras fuentes (Hernández Cerón, 2020), contaminación oceánica (Espinosa et al., 2023). Los peces son la proteína de origen hidrobiológico más consumida a nivel mundial, con un total de 162.5 millones de toneladas en 2021 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024), pero el porcentaje de explotación de sus poblaciones ha llegado a niveles biológicamente insostenibles, aumentando del 10% en 1974 al 35.4% en 2019 (Di Cintio et al., 2023), revelando la preocupante situación actual de las pesquerías.

Por ello, han surgido numerosas estrategias de conservación y protección, dirigidas a aumentar la población de las comunidades ícticas y su hábitat. La FAO ha liderado la elaboración de numerosos manuales dirigidos a abordar las problemáticas actuales de la pesca, sabiendo la importancia en la seguridad alimentaria que esta representa (2011). El Código de Conducta para la Pesca Responsable de la FAO (1995), en su artículo 6.8 respalda y justifica el establecimiento de Áreas Marinas Protegidas (AMP's), cuyo principal objetivo es conservar la biodiversidad y mejorar la ordenación pesquera, en un área geográfica marina específica (FAO, 1995). Según el objetivo que se busque al establecer una AMP, ésta puede tener diferentes categorías, diferentes lineamientos, diversas políticas y regulaciones (FAO, 2011).

Han sido numerosos los casos de éxito de AMP bien establecidas y con resultados prometedores, siendo la mayoría instauradas en países desarrollados y con economías locales favorables, como es el caso del Parque Nacional Cabo Pulmo en México (Aburto-Oropeza et al., 2011) y las AMP's establecidas en los países que abarcó el proyecto "Coordinación en Apoyo de la Ordenación Pesquera en el Mediterráneo (COPEMED)" donde participaron los países de Argelia, España, Francia, Italia, Libia, Malta, Marruecos y

Túnez (Ramos-Esplá et al., 2004). El factor común de estos casos ha sido la excelente interacción entre los actores involucrados, los objetivos de conservación y las buenas prácticas de pesca, logrando una Gestión Integrada Costera (CIG).

Sin embargo, se han reportado otros casos donde las AMP no lograron ser exitosas debido a los conflictos sociales y políticos a los que se enfrentaron en zonas económicamente vulnerables, por la falta y compromiso de los actores clave y la ausencia de regulaciones y políticas que estuvieran acordes a los objetivos de conservación, y, sobre todo, por la falta de recursos económicos que apoyaran a las AMP's (Oración et al., 2005).

Para que una AMP sea exitosa, es necesario involucrar a todos los actores claves, y crear una sinergia entre la conservación del recurso pesquero, las prácticas pesqueras tradicionales locales y las necesidades de subsistencia, aplicando las herramientas e instrumentos que acompañen en paralelo las alternativas económicas para los pescadores y un plan de gestión para la AMP.

El principal objetivo de este ensayo es contextualizar la tensión entre los actores clave en zonas económicamente vulnerables, develarlos efectos negativos y beneficiosos de las AMP's, sugerir recomendaciones para la correcta implementación de las AMP y proponer una ruta de seguimiento que refleje, de manera clara y sencilla, a los actores clave, su función y las herramientas de manejo y gestión de las AMP's.

Contenido

Las AMP's se presentan como una solución basada en la naturaleza (SBN), que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) define como: "acciones para proteger, gestionar sosteniblemente y restaurar ecosistemas naturales o modificados que abordan los desafíos sociales de manera efectiva y adaptativa proporcionando simultáneamente bienestar humano y beneficios para la biodiversidad" (Cohen-Shacham et al., 2016, p. 9).

Seis categorías de AMP's son reconocidas por la UICN, y abarcan desde las áreas de protección total hasta las áreas de usos múltiples (FAO, 2011). La versatilidad en el establecimiento de las AMP's las hace idóneas para adaptarse a las situaciones, ámbitos legales y necesidades propias de cada región (Kenchington & Kelleher, 1995; Laffoley, 1995). Su

establecimiento presenta múltiples beneficios, que no solo sosiegan los problemas de las comunidades ícticas, si no también, conservan los hábitats presentes en ella, así como su biodiversidad, riqueza y abundancia de otras especies presentes (Baskett & Barnett, 2015), y generan un efecto de “desborde” al promover la migración de una gran concentración de peces dentro de la AMP hacia las zonas adyacentes a esta (Green et al., 2015). También permiten mejorar la resiliencia de las poblaciones y ecosistemas marinos frente a las incertidumbres del cambio climático (Roberts et al., 2017). Permiten contrarrestar los efectos negativos de las prácticas de pescas no sustentables y/o ilegales promoviendo el cumplimiento de los objetivos de manejo y ordenamiento pesquero (FAO, 2012). Posibilitan el control de la mortalidad por pesca y el aumento del tamaño medio de las capturas y densidad de huevos (Russ & Alcalá, 1996).

Además de los beneficios ambientales, las AMP's también presentan beneficios económicos y sociales, entre ellos está salvaguardar el empleo a mediano y largo plazo en el sector pesquero asegurando recursos ícticos en los próximos años, creación de nuevos empleos en sectores alternos a la pesca (Ragonese et al., 2017), facilita la resolución de conflictos entre diferentes partes interesadas (Sumaila et al., 2000), promueve la investigación científica y evidencia que una gestión combinada y eficaz trae consigo resultados combinados y multipropósito (FAO, 2011).

Reconociendo sus múltiples beneficios y la importancia de las AMP's, estas han surgido como una herramienta robusta y efectiva de ordenamiento pesquero (Bonilla, 2019). Sin embargo, el éxito de estas dependerá del nivel de precisión e involucramiento comunitario que tengan al momento de iniciar con su diseño, ya que los principales protagonistas y beneficiarios de dichas áreas, son los pescadores (Suárez-Castillo et al., 2016), a quienes pocas veces se les ha considerado desde el inicio de su diseño, establecimiento y monitoreo constante. Si una AMP no involucra a los pescadores comunitarios, ni se les considera al momento de establecerla, esta no tendrá efecto alguno, pues su delimitación será infringida y no será respetada por los usuarios regulares del área (Sala et al., 2002).

Esta problemática se ha presentado en numerosos casos y a diferentes escalas, desperdiciando recursos económicos, humanos y materiales, y se han ganado una mala reputación en las áreas donde se han estable-

cido de manera no participativa, generando un rechazo por parte de los pescadores (Suárez-Castillo et al., 2016). Esta controversia e incertidumbre empezó a surgir cuando se empezaron a establecer más y más AMP a lo largo de los países latinoamericanos (Lewis et al., 2017), principalmente por las zonas coralinas, que son mucho más carismáticas que otras especies marinas (Caveen et al., 2012). La participación comunitaria es clave, no solo para involucrar a los principales actores, si no también, porque su conocimiento ancestral de la zona es vital para su delimitación geográfica, épocas de reproducción, áreas de desove y presencia de hábitats críticos (Sala et al., 2002). La opinión comunitaria es vital para la toma de decisiones y para el establecimiento de las regulaciones que regirán la AMP (FAO, 2012). Para el buen diseño e implementación de una AMP es necesario crear un equilibrio entre los líderes, comunitarios y administradores para conciliar políticas y regulaciones de gestión costera integrada, en sintonía con la mitigación de la pobreza y la protección del hábitat marino (Oración et al., 2005).

Una buena planificación en la organización para el diseño e implementación hará que la percepción de los pescadores ante las AMP en estas áreas no sea una negativa de forma rotunda y tajante, pues vivir de algo más que la pesca no es una opción (Abbott & Haynie, 2012). Aunque no todas las AMP restringen la pesca por completo, si el objetivo principal es la recuperación de las comunidades pesqueras, la restricción suele ser la mejor opción; sin embargo, para el pescador no lo es (Ramos-Esplá et al., 2004). Sin embargo, cuando se consideran todos los factores, incluido un abordaje socioeconómico de la zona, las AMP's pueden lograr un equilibrio entre la conservación del recurso íctico y los objetivos socioeconómicos (Botsford et al., 1997). Pero, para ello, es necesario el total involucramiento de todas las partes interesadas, desde los pescadores, autoridades locales, implementadores sociales y científicos (Guerra Sierra & Sánchez Lizaso, 1998).

Es necesario abordar la problemática a través de fundamento científico y con el consenso de todos los actores involucrados, lo contrario podría perjudicar el objetivo principal en relación al establecimiento de la AMP, junto a negativas consecuencias sociales, económicas y ambientales (Caveen et al., 2012). Lo ideal es empatar los objetivos de desarrollo regionales con los objetivos ambientales que se buscan al establecer la AMP, utilizando a la AMP como una plataforma para el desarrollo económico, ya sea con convenios

de conservación, eco turismo, buceos recreativos o programas de buzos monitores para la evaluación de los recursos ícticos del área (Wells & White, 1995). Es más efectiva una red de AMP's que áreas individuales, lo cual permitiría el desarrollo de varias comunidades en favor de un mismo objetivo de conservación, protegiendo el recurso pesquero a mayor magnitud, sabiendo que es un recurso móvil y no estático (FAO, 2012). De manera que, tanto los beneficios como los costos se pueden distribuir en diferentes comunidades, aumentando el éxito de la AMP considerablemente (Costanza et al., 1997).

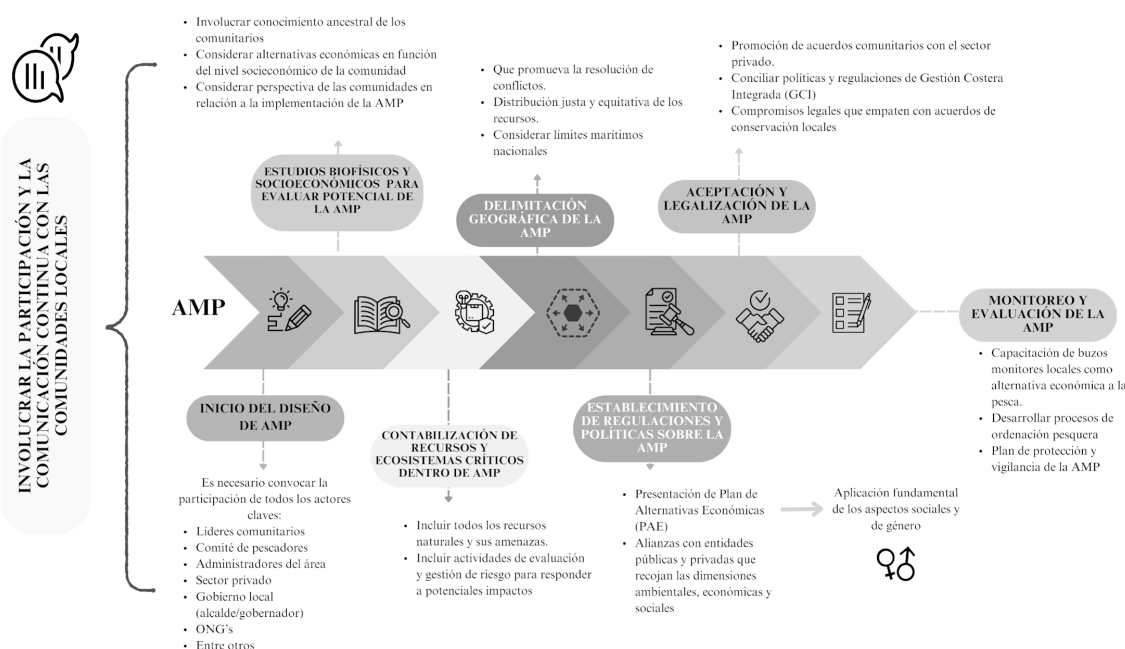
Uno de los principales errores que se cometen al establecer una AMP es la falta de un plan estratégico de actividades económicas alternas a la pesca. Debido a que el establecimiento de la AMP restringirá parcial o totalmente la actividad pesquera (Costanza, 1999) y considerando que la recuperación de una comunidad íctica puede tomar más de 10 años, como mínimo (Roberts et al., 2001, 2005; Selig & Bruno, 2010), la correcta gestión de una AMP puede fracasar por completo si los pescadores perciben que sus recursos han

sido apropiados injustamente o su acceso se ha visto restringido. Un buen diseño, implementación y gestión de una AMP siempre debe ir acompañada de dicho plan estratégico, pues además de generar alternativas económicas y recuperar el recurso pesquero, se busca el crecimiento económico y la mejora en los medios de vida de las comunidades pesqueras, haciéndolas independientes (temporalmente) a la actividad pesquera (Fiske, 1992; Wells & White, 1995).

Fortalecer el compromiso entre los actores involucrados, reconociendo su importancia y valorando el trabajo intersectorial es el núcleo de una organización comunitaria eficiente (Oración et al., 2005). Como se observa en la Figura 1, esto permitirá una acción conjunta entre las políticas regulatorias de los actores administradores y la cultura tradicional local de las comunidades, logrando una sinergia en las acciones cuyo objetivo es proteger el recurso pesquero. Al iniciar el diseño de una AMP, el primer paso es crear una convocatoria eficiente, considerando a todos los actores involucrados, e idealmente crear una mesa técnica con la que se dé seguimiento a las futuras convocatorias.

Figura 1

Ruta de seguimiento para el diseño de una AMP involucrando a los actores clave y sus herramientas



Con la participación de todos y considerando el conocimiento ancestral, local y científico, se plantean diversas propuestas. Una vez elegida la propuesta más eficiente se inician con los estudios y monitoreos en el área propuesta, e iniciar un expediente con todos los datos biológicos que sustentan y justifican la elección del área. Todos los resultados deben ser compartidos con la mesa técnica. Dentro del expediente también se debe incluir el abordaje social y económico, conociendo el valor monetario de las pesquerías en el área a trabajar. También se debe incluir un plan de alternativas económicas que se desarrollarán cuando la AMP se declare legalmente y esté protegida. Seguidamente se deben empatar todos los aspectos legales y jurídicos que se requieran para su debida legalización, y esto variará según el contexto nacional de cada país. Por último, se debe dar seguimiento a los monitoreos en el área, para evidenciar el aumento en las poblaciones ícticas de interés y la protección de los recursos naturales dentro de ella, además de ejecutar el plan de alternativas económicas con los comunitarios. Cuando todas las partes interesadas están comprometidas, se logran objetivos más allá del propuesto para una AMP, propiciando la resolución de conflictos locales y fortaleciendo las alianzas intersectoriales.

Algunos de los casos de éxito en zonas económicamente vulnerables es el de Tsitsikamma en Sudáfrica, en donde antes del 2019 más de la mitad de las 23 AMP's existentes no incluían objetivos directamente relacionados con las personas y sus necesidades. Pero gracias al trabajo en conjunto entre las comunidades y los administradores del área, han abordado los desafíos de conservación empatados a las necesidades locales, logrando un ejemplo exitoso de AMP's bien diseñadas y sostenibles con el turismo local (Mann-Lang, et al., 2021). Hoy en día es uno de los Parques Nacionales costeros con mayor éxito en conservación e ingresos por turismo.

Otro ejemplo de éxito es el de Mabini ubicado en la península de Calumpán en Filipinas, con una larga generación de pescadores, la GCI se logró mediante conservacionistas locales y extranjeros, mediante la intervención del gobierno local. Dando oportunidad a los pescadores de capacitarse como guías turísticos, creando las zonas de alta producción íctica como santuarios de protección viables para el buceo recreativo (Oración et al., 2005).

Y, por último, en Latinoamérica, cuya región es económicamente vulnerable, tiene una de las áreas con mayor éxito en tasas de recuperación pesquera en la

Región de las Grandes Islas, del Golfo de California en México, cuyo factor determinante fue un excelente diseño en la ruta de socialización para integrar al sector privado y las comunidades locales, creando una red de Zonas de Recuperación Pesquera (ZRP) que es una clasificación de AMP. Este trabajo intersectorial logró desarrollar estrategias para aumentar la adopción y creación de las ZRP, así como fortalecer la capacidad de los pescadores para participar en los procesos de toma de decisiones (Suárez-Castillo et al., 2016).

Conclusiones

La implementación de AMP's se presenta como una estrategia robusta para la conservación de los ecosistemas marinos y el manejo sostenible de los recursos pesqueros. No obstante, su éxito depende de un enfoque inclusivo que contemple la participación activa de todos los actores clave, en particular de las comunidades pesqueras. Este ensayo ha permitido contextualizar la compleja interacción entre las necesidades de conservación y las realidades socioeconómicas de zonas económicamente vulnerables, resaltando tanto los beneficios como las tensiones inherentes a las AMP.

La inclusión de los pescadores en la planificación, diseño y monitoreo de las AMP se erige como un pilar fundamental para la aceptación y efectividad de estas áreas. Ignorar su participación y conocimiento ancestral puede llevar al fracaso de la implementación, al generar conflictos y rechazo hacia las regulaciones impuestas. Por otro lado, una correcta integración de los pescadores y otros actores, apoyada por un diseño participativo y una estrategia económica que contemple actividades alternativas, fomenta un entorno de cooperación y sostenibilidad a largo plazo.

Las experiencias exitosas, como las de Tsitsikamma en Sudáfrica y las Zonas de Recuperación Pesquera en el Golfo de California, demuestran que un enfoque intersectorial, que vincule a comunidades locales, entidades gubernamentales y organizaciones privadas, puede superar barreras de implementación y proporcionar beneficios tangibles tanto para la conservación ambiental como para el desarrollo económico local.

Recomendaciones clave incluyen el establecimiento de mesas técnicas y la creación de rutas de seguimiento claras y compartidas entre los actores involucrados. La adaptación y flexibilidad de las políticas según el contexto local, junto a programas de capacitación y alternativas económicas, constituyen

pasos esenciales para maximizar los impactos positivos de las AMP. De esta manera, se garantiza no solo la protección de los recursos marinos, sino también la mejora en la calidad de vida de las comunidades pesqueras, promoviendo un equilibrio entre conservación y desarrollo sostenible.

Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del Documento: JAGD

Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: JAGD

Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: JAGD

Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: JAGD

Participación en análisis de datos, estructura y en la escritura del documento: JAGD

Referencias

- Abbott, J. K., & Haynie, A. C. (2012). What are we protecting? Fisher behavior and the unintended consequences of spatial closures as a fishery management tool. *Ecological Applications*, 22(3), 762-777. <https://doi.org/10.1890/11-1319.1>
- Aburto-Oropeza, O., Erisman, B., Galland, G. R., Mascareñas-Osorio, I., Sala, E., & Ezcurra, E. (2011). Large recovery of fish biomass in a no-take marine reserve. *PLOS One*, 6(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023601>
- Baskett, M. L., & Barnett, L. A. K. (2015). The ecological and evolutionary consequences of marine re-serves. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 46, 49-73. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054424>
- Bonilla, S. (2019). *Principios socioeconómicos y de gobernanza para el diseño de una red de zonas de recuperación pesquera en Honduras*. Centro de Estudios Marinos de Honduras.
- Botsford, L. W., Castilla, J. C., & Peterson, C. H. (1997). The management of fisheries and marine ecosystems. *Science*, 277, 509-515. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.509>
- Caveen, J., Gray, T., Stead, S., & Polunin, N. (2012). MPA policy: What lies behind the science? *Marine Policy*, 37(1), 3-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2012.04.005>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN Commission on Ecosystem Management. <https://portals.iucn.org/library/node/46191>
- Costanza, R. (1999). The ecological, economic, and social importance of the oceans. *Ecological Economics*, 31(2), 199-213. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00079-8)
- Costanza, R., d'Arge, de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Di Cintio, A., Niccolini, F., Scipioni, S., & Bulleri, F. (2023). Avoiding "paper parks": A global literature review on socioeconomic factors underpinning the effectiveness of marine protected areas. *Sustainability*, 15(5), Article 4464. <https://doi.org/10.3390/su15054464>
- Espinosa Rios, K. J., Morales Valdemar, M. A., & Jaramillo Colorado, B. E. (2023). Contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos y especies marinas: Revisión. *Ciencia en Desarrollo*, 14(2), 125-138. <https://doi.org/10.19053/01217488.v14.n2.2023.4760>
- Fiske, S. (1992). Sociocultural aspects of establishing marine protected areas. *Ocean Coastal Management*, 17(1), 25-46. [https://doi.org/10.1016/0964-5691\(92\)90060-X](https://doi.org/10.1016/0964-5691(92)90060-X)
- Green, A. L., Maypa, A. P., Almany, G. R., Rhodes, K. L., Weeks, R., Abesamis, R. A., Gleason, M. G., Mumby, P. J., & Whit, A. T. (2015). Larval dispersal and movement patterns of coral reef fishes, and implications for marine reserve network design. *Biological Review of the Cambridge Philosophical Society* 90(4), 1215-1247. <https://doi.org/10.1111/brv.12155>

- Guerra Sierra, A., & Sánchez Lizaso, J. L. (1998). *Fundamentos de explotación de recursos vivos marinos*. Acribia.
- Hernández Cerón, A. de J. (2020). *Efecto de la inclusión de harina de pescado artesanal en la alimentación de ovinos de pelo en finalización, sobre las características de la canal y calidad de la carne* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nayarit]. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/2305>
- Hutchings, J. A., & Myers, R. A. (1994). What can be learned from the collapse of a renewable resource? Atlantic cod, *Gadus morhua*, of Newfoundland and Labrador. *Canadian Journal of Fisheries and Aquaculture Sciences*, 51(9), 2126-2145. <https://doi.org/10.1139/f94-214>
- Kenchington, R. & Kelleher, G. (1995). Making a management plan. En S. Gubbay (Ed.), *Marine protected areas. Principles and techniques for management* (Conservation Biology Series; Vol. 5, pp. 85-102) Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0527-9_5
- Laffoley, D. (1995). Techniques for managing marine protected areas: Zoning. En S. Gubbay (Ed.), *Marine protected areas. Principles and techniques for management* (Conservation Biology Series; Vol. 5, pp. 103-104) https://doi.org/10.1007/978-94-011-0527-9_6
- Lewis, E., MacSharry, B., Juffe-Bignoli, D., Harris, N., Burrows, G., Kingston, N., & Burgess, N. (2017). Dynamics in the global protected-area estate since 2004. *Conservation Biology*, 33(3), 570-579. <https://doi.org/10.1111/cobi.13056>
- Lindholm, J., Auster, P., Ruth, M., & Kaufman, L. (2001). Modeling the effects of fishing and implications for design of marine protected areas: Juvenile fish responses to variations in seafloor habitat. *Conservation Biology*, 15(2), 424-437. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.015002424.x>
- Mann-Lang, J., Mann, B., Sink, J., Kirkman, S., & Adams, R. (2021). Social and economic effects of marine protected areas in South Africa, with recommendations for future assessments. *African Journal of Marine Science*, 43(3), 367-387. <https://doi.org/10.2989/1814232X.2021.1961166>
- Oración, E. E., Miller, M. L., & Christie, P. (2005). Marine protected areas for whom? Fisheries, tourism, and solidarity in a Philippine community. *Ocean & Coastal Management*, 48(3-6), 393-410. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2005.04.013>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1995). *Código de conducta para la pesca responsable*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). *Gestión pesquera 4: Áreas marinas protegidas y pesquerías; Directrices técnicas de la FAO para la pesca responsable*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *FAO Workshop on International Guidelines For Securing Sustainable Small-Scale Fisheries*
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción*.
- Ragonese, S., Cannizzaro, L., Norrito, G., & Jereb, P. (2017). *Cierre discreto de viveros como herramienta de gestión para la pesca demersal: El caso del mar Mediterráneo*. Comisión Nacional de Energía de Chile.
- Ramos-Esplá, A. A., Valle-Pérez, C., Bayle-Sempere, J. T., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2004). *Áreas Marinas Protegidas como herramientas de gestión pesquera en el Mediterráneo (Área COPEMED)* (Serie Informes y Estudios COPEMED nº11).
- Roberts, C. M., Bohnsack, J., Gell, F., & Goodridge, R. (2001). Effects of marine reserves on adjacent fisheries. *Science*, 294(5548), 1920-1923. <https://doi.org/10.1126/science.294.5548.1920>
- Roberts, C. M., Hawkins, J. P., & Gell, F. R. (2005). The role of marine reserves in achieving sustainable fisheries. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 360(1453), 123-132. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1578>
- Roberts, C. M., O'Leary, B. C., McCauley, D. J., & Castilla, J. C. (2017). Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6167-6175. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701262114>

- Russ, G. R., & Alcala, A. (1996). Do marine reserves export adult fish biomass? Evidence from Apo Island, central Philippines. *Marine Ecology Progress Series*, 132, 1-9. <https://doi.org/10.3354/meps132001>
- Sala, E., Aburto-Oropeza, O., Paredes, G., Parra, I., Barrera, J. C., & Dayton, P. K. (2002). A general model for designing networks of marine reserves. *Science*, 298(5600), 1991-1993. <https://doi.org/10.1126/science.1075284>
- Selig, E. R., & Bruno, J. F. (2010). A global analysis of the effectiveness of marine protected areas in preventing coral loss. *PLOS One*, 5(2), Artículo e9278. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009278>
- Suárez-Castillo A. N., Torre, J., Mancha-Cisneros, M. del M., Álvarez-Romero, J. G., & Espinosa-Romero, M. J. (2016). Ruta de sociabilización para integrar al sector productivo en el diseño de una red de zonas de recuperación pesquera en la Región de las Grandes Islas, Golfo de California. *Ciencia Pesquera*, 24(2), 65-79. <https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/08.pdf>
- Sumaila, U. R., Guénette, S., Alder, J., & Chuenpagdee, R. (2000). Addressing ecosystem effects of fishing using marine protected areas. *ICES Journal of Marine Science*, 57, 752-760. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0732>
- Wells, S., & White, A. T. (1995). Involving the community. En S. Gubbay (Ed.), *Marine Protected Areas. Principles and techniques for management* (Conservation Biology series; Vol. 5, pp. 61-84). Chapman y Hall. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0527-9_4

Instrucciones para autores

Ciencia, Tecnología y Salud es la Revista de Investigación y Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala, orientada a divulgar los conocimientos de las áreas científicas, tecnológicas y de la salud humana y animal a la comunidad científica nacional e internacional. Constituye una publicación de carácter semestral no lucrativa en formato digital (Open Journal System-OJS) y en forma impresa, cuyos manuscritos, aceptados para publicación son sometidos a procesos de revisión y arbitraje por pares ciegos y externos, lo que garantiza al lector y autores un alto nivel y rigor académico.

Instrucciones generales (lea detenidamente todas las instrucciones para autor)

1. La Revista publica los siguientes tipos de manuscritos:
 - a. Artículos científicos
 - b. Artículos de revisión
 - c. Ensayos
 - d. Reseñas
 - e. Reporte de casos
 - f. Comunicaciones cortas
 - g. Conferencias de congresos científicos
 - h. Resúmenes de congreso
2. La revista presta consideración editorial a artículos originales inéditos en idioma español e inglés. Si el material a publicar ha sido presentado en forma parcial en algún Congreso Científico, indíquelo al final del resumen o en carta al editor.
3. Para enviar un manuscrito regístrese como autor en la plataforma OJS, (sección registrarse), los artículos incompletos que no cumplan las Instrucciones para Autores, serán devueltos sin evaluación.
4. Todos los trabajos deben presentarse en formato MS Word (versión 2007) o formato LaTeX (por medio de la plantilla que puede descargar en <https://github.com/hepfpeh/cts-DIGI>). Tamaño carta, letra Times New Roman 12 puntos, interlineado de 1.5, márgenes de 2.5 cm, a una columna, sin justificar, páginas numeradas y las citas y referencias de acuerdo al Manual de Publicaciones de la *American Psychological Association* (APA) 7a. edición. El sistema de medidas utilizado debe ser el sistema métrico decimal y las palabras en otro idioma deben aparecer en cursiva, excepto las abreviaturas comunes en el idioma en que se escribe (et al., per se, a priori, etc.)
5. Todos los trabajos deben incluir una portadilla, donde se consigne el título corto (no mayor a 11 palabras), título en español e inglés, los nombres de los autores (nombre, apellido), su afiliación institucional (utilizar números arábigos en superíndice) y dirección electrónica para enviar correspondencia (se indicará al autor con un asterisco).
6. Los manuscritos que informen investigaciones con seres humanos o animales, deben incluir una sección de Aspectos Éticos del trabajo, incluyendo la aprobación por un Comité de Ética cuando corresponda, el consentimiento informado en caso de estudios con seres humanos y los procedimientos utilizados para el manejo ético de animales de laboratorio.

7. Las tablas, figuras e imágenes, deben ser enviadas en archivos separados (archivos complementarios OJS) y en el formato original utilizado (Ej. .doc, .docx, .xls, .xlsx, .png, .jpg, TIFF). Las imágenes en colores, deben tener un mínimo de 300 dpi de resolución. Para el caso de mapas, se debe colocar los créditos, sistema de coordenadas y escala.

Instrucciones específicas:

Se recomienda a los autores revisar un número anterior de la revista para visualizar el contenido del artículo previo a su envío.

1. Artículo científico

Son artículos que informan sobre resultados de proyectos de investigación. La extensión máxima es de 20 páginas e incluye lo siguiente:

- a. Resumen: Objetivos, metodología, resultados más relevantes y conclusión. No más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
- b. Abstract (inglés): Objetivos, metodología, resultados más relevantes y conclusión. No más de 250 palabras, incluir 5 keywords
- c. Introducción
- d. Métodos
- e. Resultados
- f. Discusión
- g. Agradecimientos (incluir fuente y número de financiamiento)
- h. Referencias (Normas APA)
- i. Tablas y Figuras (Normas APA)

2. Artículos de revisión

Los artículos de revisión presentan temas de importancia tratados por expertos y únicamente se aceptan por invitación del Consejo Editorial. La extensión máxima es de 20 páginas y deben incluir lo siguiente:

- a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
- b. Abstract (inglés): incluir 5 keywords
- c. Introducción

- d. Contenido
- e. Conclusiones
- f. Referencias (mínimo 50 referencias)
- g. Tablas y Figuras (Normas APA)

3. Ensayos

Los ensayos son trabajos en que el autor aborda su interpretación de un tema relevante a la ciencia, la tecnología o la salud. Plantea argumentos y opiniones personales basados en literatura científica, concluyendo con una posición sobre el tema seleccionado. La extensión máxima es de 20 páginas e incluye lo siguiente:

- a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
- b. Abstract
- c. Introducción
- d. Contenido
- e. Conclusiones
- f. Referencias (Normas APA)

4. Reseñas

Las reseñas son revisiones y comentarios sobre nuevos libros (con ISBN), videos u otras obras. Su extensión máxima es de dos páginas y su formato es libre. Debe incluir la referencia bibliográfica completa, fotografía de la obra y dirección electrónica cuando aplique.

5. Reporte de casos

Estos artículos presentan en forma detallada y documentada casos especiales que merezcan la atención del ámbito de la revista. Pueden ser casos clínicos, tecnológicos o de otros campos de la ciencia. La extensión máxima es de 10 páginas e incluye lo siguiente:

- a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
- b. Abstract: incluir 5 keywords
- c. Introducción
- d. Presentación del caso
- e. Discusión
- f. Referencias (Normas APA)
- g. Tablas y Figuras (Normas APA)

6. Comunicaciones cortas

Estos artículos presentan datos de interés sobre un estudio limitado o resultados preliminares de una investigación de impacto. Los artículos breves incluyen (pero no se limitan): desarrollo de nuevos materiales, experimentos y teoría de vanguardia, novedad en simulación y modelación, elucidación de mecanismos químicos. La extensión máxima es de 10 páginas e incluye lo siguiente:

- a. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
- b. Abstract: incluir 5 keywords
- c. Introducción
- d. Métodos
- e. Resultados
- f. Discusión
- g. Agradecimientos
- h. Referencias

7. Conferencias de congresos científicos

Son conferencias presentadas en congresos o eventos científicos acordes a la temática de la revista. El Comité Organizador del congreso o evento científico hace una solicitud formal al Comité Editorial para la asignación editorial. Las conferencias son revisadas, editadas y seleccionadas por el Comité Organizador y no son evaluadas por pares. La extensión máxima es de 20 páginas e incluye lo siguiente:

- a. Portadilla
- b. Resumen: no más de 250 palabras. Incluir 5 palabras clave
- c. Abstract y keywords
- d. Introducción
- e. Contenido
- f. Conclusiones
- g. Referencias (Normas APA)

8. Resúmenes de congreso

Se publicarán ponencias orales o de poster de Congresos que así lo soliciten. Los trabajos incluyen:

- a. Título en español e inglés
- b. Nombre y afiliación de los autores
- c. Nombre del autor responsable al que se dirige la correspondencia
- d. Resumen: objetivo, metodología, resultados más relevantes y conclusión. Máximo 250 palabras, incluir 5 palabras clave.
- e. Abstract (resumen en inglés), incluir 5 keywords.
- f. Nombre del Congreso, lugar y fecha, y modo en que fue presentado (Oral o Póster)

Proceso de publicación

El proceso de publicación tiene tres etapas. La primera realizada por el Comité Editorial para revisar formato, redacción, estructura y estadística; con las observaciones se devuelve al autor para su corrección. La segunda etapa consiste en el envío a pares ciegos externos, en caso de opiniones contradictorias, se enviará a un tercer par. La última etapa consiste en la edición final (filología), diagramación y aceptación de prueba de imprenta. Los autores deberán contestar las demandas de corrección en cada etapa, en un máximo de 30 días, en caso contrario, el manuscrito se declarará rechazado y deberá comenzar el trámite de aceptación nuevamente.



Unidad de Publicaciones y Divulgación



La impresión de este documento se realizó en la Unidad de Publicaciones y Divulgación de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en 2026, con un tiraje de 100 ejemplares, en papel bond 75 g. Guatemala C. A.

Los artículos científicos son indexados en:

latindex

ROAD

DOAJ DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

LILACS

BASE

<http://digi.usac.edu.gt/ojsrevistas>

Editorial

Artículos Científicos

*Use of Telemetry for Tracking Two Individuals of Resplendent Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) in the Mountains of Baja Verapaz, Guatemala*

Michelle Bustamante-Castillo, Bianca Bosarreyes, Manuel A. Barrios-Izás

Fenotipo de inestabilidad de microsatélites en Carcinoma colorrectal mediante la expresión de proteínas reparadoras del ADN

Orlando Rodas-Pernillo, Edith Oregón, Oscar Cobar, Abbas Chakhtoura, J., Hugo Cardona, Federico Nave, Elisa Hernández

Propagación de dos helechos arborescentes (Cyatheaceae) del bosque nuboso guatemalteco por medio de tres metodologías diferentes

Andrea M. Cabarrús

Ensayo Científico

*La Región Central de Guatemala, un Área Olvidada en el Estudio y Conservación del Quetzal (*Pharomachrus mocinno*)*

E. Daniel Tenez, A. Lucía Grajeda, Claudia L. Burgos

Océanos de oportunidades: Áreas Marinas Protegidas y su potencial en regiones económicamente vulnerables

Jenniffer Alejandrina García Dardón