

Por más que los biólogos exploren el suelo, los árboles y las corrientes de agua, parecen hallarse lejos aún de poder estimar o explicar la diversidad biológica de las selvas tropicales. Es más, todavía no se ha podido explicar cómo y cuándo surgieron las montañas, los ríos y todo lo que se encuentra dentro de la selva. En la actualidad hay proyectos centrados en la Amazonia y en el Bosque Atlántico que indagan en busca de esas respuestas: biólogos y geólogos están trabajando juntos para intentar descifrar esta historia en el marco de una disciplina que en 2014 fue bautizada con el nombre de geogenómica por el geólogo Paul Baker, de la Universidad Duke, en Estados Unidos. Un gran impulso en ese campo provino de la cooperación entre los programas Biota-FAPESP y Dimensions of Biodiversity, de la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF, por sus siglas en inglés), la principal agencia estadounidense de fomento de la ciencia. “Los proyectos de esta naturaleza requieren un abordaje participativo desde la propia elaboración de las preguntas”, comenta la botánica Lúcia Lohmann, del Instituto de Biociencias de la Universidad de São Paulo (IB-USP),

quien coordina junto al ornitólogo estadounidense Joel Cracraft, del Museo Americano de Historia Natural, el primer proyecto que materializa la colaboración, enfocado en la Amazonia.

Para la conformación de los equipos, fue necesario inicialmente vencer las barreras básicas de comunicación. “Un geólogo brindaba una conferencia y los biólogos quedaban perdidos”, relata Lohmann. Y viceversa. “En el primer encuentro, nos pasamos dos horas explicándoles una sola diapositiva a los geólogos”, recuerda la bióloga Cristina Miyaki, también del IB-USP y coordinadora de un proyecto similar, en este caso, del Bosque Atlántico. Una vez que pudo establecerse un vocabulario en común, el intercambio comenzó a cobrar forma. “Ahora resulta obvio que los proyectos de esa naturaleza deben contar con investigadores de ambas áreas desde el comienzo, pero anteriormente ésa no era la perspectiva”, dice Lohmann.

Otro obstáculo que no es nada trivial para la integración del conocimiento se basa en la escasez de datos. “Necesitamos contar con todas las filogenias datadas, con bancos de datos georreferenciados para poder elaborar mapas de

Para entender el origen de la selva

Biólogos y geólogos aúnan esfuerzos para explicar la diversidad biológica de la Amazonia y del Bosque Atlántico y crean una nueva disciplina, la geogenômica

Maria Guimarães

PUBLICADO EN ABRIL DE 2016

distribución antes de poder cruzarlos con los datos geológicos”, comenta Lohmann. Ella y sus colaboradores tienen planes para efectuar este año una expedición a la Amazonia. “Vamos a recolectar datos de diferentes organismos para evaluar en qué extensión los ríos Negro y Branco representan barreras para la dispersión”.

Resulta fácil imaginarse que los ríos caudalosos limitan la movilidad de los organismos; pero, cuando los biólogos recurren al ADN para recabar información de la historia de las especies, no siempre es eso lo que se evidencia. “Para las plantas, los ríos no parecen constituir barreras importantes”, dice Lohmann, que es experta en la familia Bignoniaceae. En tanto, la circulación de los primates podría hallarse limitada por éstos, tal como muestra el primatólogo brasileño Jean Philippe Boubli, de la Universidad de Salford, en Inglaterra. Boubli también es investigador del Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonia (Inpa, por sus siglas en portugués), y por ello tiene acceso a un archivo importante de muestras de primates que guarda la institución. “Contamos con una cobertura casi completa de muestras de primates amazónicos y, a partir de

los datos que aporta la genómica, vamos a poder estudiar el papel de los grandes ríos en el origen de la diversidad del grupo”, planea. Luego de la publicación en marzo de este año de una nueva filogenia de los huicocos, que también son denominados socayos o más genéricamente titíes (*Callicebus*), en la revista *Frontiers in Zoology*, él y su alumna de doctorado Hazel Byrne, junto a otros colegas, señalan divergencias profundas que justifican la creación de dos nuevos géneros: *Cheracebus*, para las especies de los ríos Negro y Orinoco, y *Plecturocebus*, en el sur del Amazonas. La denominación *Callicebus* quedaría reservada a las especies del Bosque Atlántico. “Ellos podrían ser la clave de todo”, dice el investigador. Se trata de un grupo muy antiguo y abundante en especies, por lo cual resulta ideal para testear el rol de factores tales como los ríos y los cambios climáticos en la diversificación de las especies. “La cooperación con los geólogos nos está revelando cosas que no conocíamos de la Amazonia”, dice.

“Lo que va quedando claro es que las hipótesis postuladas en las últimas décadas acaban por ser demasiado simplistas para la complejidad de la Amazonia”, reflexiona la bióloga Camila Ribas,

Ramas prensadas y secas se almacenan como registros de especies de plantas, tal como este ejemplar de *Pyrostegia venusta*

del Inpa, quien forma parte del proyecto de Lohmann y también del de Baker. “La Teoría de los Refugios plantea que las especies actuales habrían surgido durante los ciclos glaciales, el último de los cuales ocurrió hace alrededor de 18 mil años”, cita como ejemplo. Pero las diferentes regiones de la Amazonia parecen haber atravesado procesos distintos y las especies responden en forma diferente a las condiciones locales. Las aves, que son la especialidad de Ribas, constituyen un buen ejemplo de organismos muy heterogéneos en la batalla con el ambiente: aquéllas que logran volar grandes distancias, por ejemplo, resultan menos afectadas por las barreras. En el extremo opuesto, los trompeteros (género *Psophia*), unas aves amazónicas que casi no vuelan, se convirtieron en el ejemplo por excelencia del modo de funcionamiento de los grandes ríos como las principales barreras entre especies, según el estudio publicado en 2012 en la revista *Proceedings of the Royal Society B* por Ribas y colaboradores.

Uno de los proyectos más recientes de la bióloga del Inpa se vuelca al estudio de la fauna de aves típicas de áreas de arenas blancas en la Amazonia, tal como relata en un artículo publicado este año en la revista *Biotropica*, resultado de la maestría de su alumna Maysa Matos. “Constituyen motas de arena blanca en medio de un mar de selva, con una vegetación abierta, que se asemeja más a la de la Caatinga o a la del Cerrado”, explica Ribas. Lo sorprendente, es que los animales hallados en esas “manchas” de arena distantes son más similares que lo que cabría imaginarse, aunque hoy en día no logren atravesar la selva. Esos resultados suscitan una serie de preguntas, tales como cuánto tiempo hace que existe ese ecosistema y si en el pasado, la selva habría sido más permeable para esos animales.

Otro de los alumnos de Ribas, Leandro Moraes, estudió durante su maestría el rol de los ríos Tapajós y Jamanxim, en el estado de Pará, para limitar la distribución de anfibios y reptiles. Los resultados, que se publicarán en breve en la revista *Journal of Biogeography*, revelan que un tercio de las especies de anfibios ven restringido su desplazamiento por los ríos, un porcentaje que desciende a tan sólo un 8% para los ofidios y lagartos. Ese trabajo apunta a analizar la importancia de estos ríos en la configuración del paisaje y de los hábitats adecuados para esos animales, y por eso Ribas lo considera un ejemplo de cómo el proyecto comienza a integrar las áreas de conocimiento.

UN PAISAJE MUTANTE

En los últimos años, comenzó a consolidarse una noción de que el drenaje de la cuenca amazónica evolucionó, mayormente, en los últimos tres millones de años (y no 15 millones, tal co-



1

La cooperación nos está revelando cosas que no sabíamos acerca de la Amazonia, dice Boubli

mo postulaban las estimaciones anteriores), una escala temporal que parece coincidir con lo que indican los datos recabados entre la flora y la fauna. El istmo de Panamá, otra estructura muy significativa para la biogeografía porque posibilitó migraciones entre Sudamérica y América Central y del Norte, también actualizó su edad. Un estudio conducido por el geólogo Camilo Montes, de la Universidad de los Andes, en Colombia, publicado en la revista *Science* en el mes de abril de 2015, analizó minerales de origen panameño hallados en América del Sur y calculó que esa formación data de hace entre 13 y 15 millones de años, unos 10 millones de años más antigua en comparación con lo que se creía antes. “Esta nueva datación modifica totalmente el modo de concebir el desplazamiento pasado de la flora y la fauna de la región, nos obliga a recomponer toda la literatura”, dice Lúcia Lohmann.

Esta reconstitución se ha revelado mucho más productiva con la unión de expertos. “Los evolucionistas y biogeógrafos deben conocer la historia geológica para comprender por qué las especies habitan donde lo hacen, e incluso cómo es que surgieron”, explica Paul Baker, el inventor del término “geogenómica”. Baker tiene un plan ambicioso, que consiste en realizar cinco perforaciones de sondeo en las cercanías de los grandes ríos amazónicos, con profundidades que podrían llegar a los dos kilómetros, para contar con un acceso permanente a muestras de sedimentos de



2

varias edades, hasta alrededor de unos 65 millones de años atrás. En el marco de una reunión en el Inpa que se llevó a cabo el año pasado, él y otros colegas del proyecto de la Amazonia arribaron a un acuerdo sobre qué tipos de datos que se obtengan por medio de ese emprendimiento podrían ayudar a reconstruir la historia geológica, climática y biótica. El desafío pasa ahora por conseguir la financiación. “Nuestro presupuesto, sólo para la perforación, es de siete millones de dólares”, comenta.

El proyecto de Baker parte de la geología, mientras que en el de Lohmann, las indagaciones surgen mayormente de la biología. Con todo, la geogenómica pretende erigirse en una vía de doble mano. “La idea es que los geólogos también puedan utilizar datos biológicos para brindar respuestas a planteos geológicos”, dice Baker. Las fechas estimadas para el surgimiento de las especies de trompeteros de Ribas, por ejemplo, podrían ayudar a realizar un cálculo de la edad de los grandes ríos, tales como el Amazonas, el Xingú, el Tapajós y el Madeira, opina Baker.

“Los datos biológicos aportan un orden de magnitud, que permite generar las hipótesis que podemos testear con las edades absolutas provenientes de dataciones geocronológicas”, coincide el sedimentólogo Renato Almeida, del Instituto de Geociencias (IGc) de la USP. Junto a su colega André Sawakuchi, Almeida estudia la formación de los depósitos sedimentarios que componen la cuenca amazónica. “Se trata de un área del tamaño de un continente con una escasez de datos ilógica”, sostiene. Pero la disminución de tal desconocimiento no es una labor que pueda realizarse dentro de los tiempos del proyecto actual, y la mayor parte de los datos que el grupo viene recabando aún no se han publicado. Además de comenzar a esbozar un cuadro geográfico del pasado, una de las misiones del equipo consiste en ayudar a los biólogos a distinguir cuáles de las hipótesis

Los grandes ríos limitan la distribución de especies tales como *Psophia crepitans* (a la izq.) y *Cebus olivaceus* (abajo), pero no así de plantas cuyas semillas son transportadas por el viento (arriba)

cuentan con mayor fundamento para brindar una explicación de los modelos biogeográficos.

El trabajo está revelando que el alzamiento de la cordillera de los Andes, poco a poco fue desplazando hacia el este el agua de un inmenso lago que había en la región, lo cual fue formando los drenajes de mayor porte en dirección al océano Atlántico. Una de las técnicas para develar el pasado de los ríos es la luminiscencia ópticamente estimulada, que depende de la recolección, en tubos de aluminio, de sedimentos de las barrancas que contornean los ríos. “De regreso en el laboratorio, logramos datar la última vez que un grano de cuarzo estuvo expuesto a la luz solar”, explica el geógrafo Fabiano Pupim, investigador de posdoctorado en el laboratorio de Sawakuchi. El grupo también vislumbra abundante información en la configuración de los sedimentos de esos paredones junto a los ríos, que llegan a medir 20 metros de altura. Las estructuras internas permiten inferir la escala y el sentido del río al momento de depositarse aquel sedimento, entre otros datos.

Imágenes registradas mediante la técnica del sonar muestran que el lecho de los ríos como el Amazonas, otro territorio desconocido, presentan dunas de hasta 12 metros de altura. “Necesitamos entender cómo funciona un río con esas dimensiones para inferir cómo eran los grandes ríos del pasado”, dice Almeida. En un trabajo conjunto con el geólogo Carlos Grohmann, del Instituto de Energía y Ambiente (IEE) de la USP, él también investiga la dinámica de los ríos por medio de series temporales de imágenes por satélite.

La importancia es mayor que la función de los ríos como barreras. Los cursos de agua y los sedimentos provenientes de los Andes formaron el mosaico de hábitats que caracterizan a la Amazonia, con áreas secas y otras de inundación periódica. Sawakuchi, junto a Pupim y el resto de su



3



En un laboratorio solamente iluminado por luz roja puede comprobarse cuánto hace que un sedimento estuvo expuesto a la luz solar

equipo (especialmente los alumnos de maestría Dorília Cunha y Diego Souza) han estudiado la formación de los archipiélagos de Anavilhanas y de Tabuleiro do Embaubal, en los ríos Negro y Xingú, respectivamente, en los últimos 10 mil años. El surgimiento de ese tipo de ambiente y de los ríos propiamente dichos representa escalas distintas de tiempo, cuyo significado el geógrafo espera poder complementar con los datos biológicos.

CLIMA FLUCTUANTE

Pero las selvas no dependen solamente del agua terrestre. Francisco William da Cruz Júnior, del IGc-USP y uno de los coordinadores de la parte geológica dentro de la geogenómica brasileña, emplea espeleotemas (formaciones de composición carbonática de las cavernas), principalmente estalagmitas, para deducir el clima del pasado. Los datos obtenidos por su grupo de investigación indican que la Era Glacial acaecida en América del Sur no era árida como se creía. “Parte del continente estaba seco, pero otras áreas eran húmedas, algo que podría haber propiciado incluso la expansión de las selvas, como en el caso de la Amazonia peruana y el segmento sur del Bosque Atlántico”, sostiene.

Con base en el análisis de isótopos de oxígeno presentes en el carbonato de calcio del material de las cavernas, Da Cruz Júnior observa que diferentes sectores de la Amazonia y regiones adyacentes atravesaron procesos muy distintos, como queda claro en el artículo que redactó, en conjunto con biólogos del equipo, bajo la coordinación del colega chino Hai Cheng, y que fuera publicado en 2013, en la revista *Nature Communications*. Las dataciones señalan que, en los últimos 250 mil años, el clima del oeste de la Amazonia

se mantuvo más estable que en la región oriental, en el estado de Pará, con un recrudescimiento de las lluvias durante los períodos glaciales, entre 100 mil y 20 mil años atrás. El grupo le adjudica a esa relativa estabilidad la responsabilidad de la alta diversidad que hoy puebla la región, mientras que el sector del este de la Amazonia, menos abundante en especies, sufrió variaciones climáticas drásticas que pueden haber conducido a extinciones. “Estamos desafiando un paradigma”, dice Da Cruz. “La estabilidad climática podría haber sido más importante que los refugios para generar el modelo de alta diversidad hoy en día presente en la selva Amazónica, principalmente en el sector andino”.

Durante el período glacial, el oeste de la Amazonia parece haber sido bastante húmedo, tal como los dominios del Bosque Atlántico en el sur y sudeste brasileños. Da Cruz cuenta con indicios de una banda climática que une esas dos regiones y presenta características opuestas al área que incluye a Pará, en el este de la Amazonia, y la región nordeste, que varía en ciclos de alrededor de 23 mil años. “Este modelo está siendo testeado tanto en el proyecto de la Amazonia como en el del Bosque Atlántico”. Da Cruz sostiene que esas correspondencias posibilitaron la formación de corredores entre ambos biomas, que explican los casos de mayor parentesco entre especies de la Amazonia y del Bosque Atlántico, en relación con el de especies de un mismo bioma. Y postula que en un período en el cual se supone una alta humedad en el este de la Amazonia y en el nordeste del país, las selvas tropicales se habrían expandido, formando un puente de selva entre ambos biomas. Posteriormente, existen indicios de lluvias más abundantes en la región más próxima a la falda de los Andes y en el sur y sudeste brasileños, también con posibilidades de expansión de las selvas hasta la confluencia de la Amazonia con el Bosque Atlántico. “Actualmente estamos testeando cuáles serían esas etapas”.

Un vestigio de esa dinámica lo constituyen las hojas fosilizadas recolectadas por Da Cruz en el valle del río São Francisco, una región hoy cubierta por bosque xerófilo, la Caatinga. “Ellas indican que la región fue rápidamente cubierta por vegetación húmeda entre 18 mil y 15 mil años atrás”, afirma. Incluso en la actualidad, existe una conexión climática directa entre los dos biomas: en el verano, la humedad procedente de la Amazonia determina lo que sucede en el Bosque Atlántico, por ejemplo. “No se puede restringir el estudio a un panorama local, ni tampoco resulta interesante”, dice Da Cruz.

El proyecto del Bosque Atlántico, que se inició un año después que el de la Amazonia, está coordinado por las biólogas Cristina Miyaki, de la USP, y Ana Carolina Carnaval, de la Universi-



dad de la Ciudad de Nueva York, y se encuentra en una etapa más inicial de integración entre las especialidades. “Varios artículos en los cuales estamos trabajando en este tercer año incluyen la perspectiva o la hipótesis que el equipo de paleoclimatólogos (o el de teledetección) aportó a nuestro equipo”, dice Carnaval. Un trabajo con datos genómicos que testean las hipótesis planteadas por Da Cruz y otros integrantes del equipo geológico, como es el caso de la palinóloga Marie-Pierre Ledru, del Instituto de Ciencias de la Evolución de Montpellier, en Francia se encuentra en su fase final para una posterior publicación. “Es algo muy bueno porque la paleoclimatología indica un camino que la genómica prueba y detecta lo que coincide y lo que no”, comenta. “Luego, retrotraemos el debate para los paleoclimatólogos, para perfeccionar las ideas”.

Los resultados están apareciendo y prometen rendir muchos frutos en los próximos años, cuando la financiación actual ya haya sido reemplazada por otros proyectos. El acuerdo de cooperación, según parece, sería el mayor logro. “Estamos comenzando a delimitar lo que aún no se ha comprendido”, dice Miyaki. Su trabajo siempre incluyó supuestos del campo de la geología para comprender la diversificación de las aves en el Bosque Atlántico. Pero ahora, con este nuevo

aprendizaje, queda la sensación de que los análisis eran muy superficiales y las interpretaciones, pese a ser las mejores posibles en su época, ingenuas.

La geogenómica constituye un ejemplo de la mejor ciencia moderna. “De cierto modo, volvemos a la historia natural antigua, donde los investigadores poseían conocimientos de biología y geología”, bromea Miyaki. Empero, con técnicas cada vez más especializadas, bancos de datos más y más gigantescos y un nivel creciente de detalles, la única manera de confluir en ese conocimiento radica en la congregación de grandes grupos. Ya pasados los primeros años en los cuales cada especialidad se dedicó a producir trabajos similares a los que realizaban antes, de ahora en adelante deberían comenzar a aparecer los resultados realmente integrados. ■

Las capas de una estalagmita (arriba) y hojas fosilizadas (abajo) son indicadores del clima del pasado



Proyectos

1. Conformación y evolución de la biota amazónica y su ambiente: un abordaje integrativo (nº 2012/ 50260-6); **Modalidad** Proyecto Temático; **Investigadores responsables** Lúcia Lohmann (IB-USP) y Joel Cracraft (AMNH); **Inversión** R\$ 3.752.671,77
2. Workshop Dimensions US-Biota São Paulo: integración de disciplinas para una predicción de la biodiversidad del Bosque Atlántico en Brasil (nº 2013/ 50297-0); **Modalidad** Proyecto Temático; **Investigadoras responsables** Cristina Miyaki (IB-USP) y Ana Carolina Carnaval (CUNY); **Inversión** R\$ 3.781.927,16.

Artículos científicos

- BAKER, P. A. et al. The emerging field of Geogenomics: Constraining geological problems with genetic data. **Earth-Science Reviews**. v. 135, p. 38-47. ago. 2014.
- BYRNE, H. et al. Phylogenetic relationships of the New World titi monkeys (*Callicebus*): First appraisal of taxonomy based on molecular evidence. **Frontiers in Zoology**. v. 13, n. 10. 1º mar. 2016.
- CHENG, H. et al. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. **Nature Communications**. v. 4, n. 1.411. 29 ene. 2013.
- MATOS, M. V. et al. Comparative phylogeography of two bird species, *Tachyphonus phoenicius* (Thraupidae) and *Polytmus theresiae* (Trochilidae), specialized in Amazonian White Sand Vegetation. **Biotropica**. v. 48, n. 1, p. 110-20. ene. 2016.
- MORAES, L. J. C. L. et al. The combined influence of riverine barriers and flooding gradients on biogeographical patterns for amphibians and squamates in south-eastern Amazonia. **Journal of Biogeography**. En prensa.
- RIBAS, C. C. et al. A palaeobiogeographical model for biotic diversification within Amazonia over the past three million years. **Proceedings of the Royal Society B**. v. 279, n. 1.729, p. 681-9. 11 ene. 2012.