

EL PERÚ FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Resultados de investigaciones
franco-peruanas



Con el apoyo de la Embajada de Francia en el Perú y la Cooperación Regional Francesa para los Países Andinos



2

Cambios climáticos del Holoceno

Apáéstegui J.^{1,2}

Sifeddine, A.^{2,3,4}

Turcq B.^{2,3,4}

da Cruz W.^{2,5}

Guyot J-L.^{3,6}

Cheng. H.⁷

Bernal, J.P.⁸

Leite da Silva Dias P.^{2,9}

Albuquerque A.L.S.^{2,10}

Cordeiro R.C.^{2,10}

Belem A.^{2,10}

Moreira-Turcq P.^{3,6}

Gutiérrez D.^{2,11}

Ortlieb. L.^{2,3,4}

Velazco F.^{2,11}

¹ Instituto Geofísico del Perú – IGP, Lima, Perú

² Laboratoire Mixte International Paléoclimatologie tropicale : traceurs et variabilité - LMI PALEOTRACES (IRD France, UFF Brasil, UANTOF Chile, UPCH Perú)

³ Institut de Recherche pour le Développement – IRD

⁴ Laboratoire d’Océanographie et du Climat: expérimentations et approches numériques – LOCEAN (CNRS, IRD, Museum National d’Histoire

Naturelle, Université Paris 6), Paris, France

⁵ Instituto de de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, Brasil

⁶ Géosciences Environnement Toulouse - GET, (CNRS, IRD, Observatoire Midi-Pyrénées, Université Toulouse 3), Toulouse, France

⁷ Institute of Global Environmental Change, Xi’an Jiaotong University, Xi’an, China

⁸ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, México

⁹ Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG, São Paulo, Brasil

¹⁰ Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense - UFF, Niterói, Brasil

¹¹ Instituto del Mar del Perú - IMARPE, Callao, Perú

RESÚMENES

Español

Existe una variabilidad natural del clima. Se debe tanto a factores externos (como el cambio de la órbita de la Tierra) como internos (como erupciones volcánicas o movimientos tectónicos entre otros). Los paleo-climatólogos estudian los cambios del clima del pasado a través de complejos análisis de sedimentos de lagos, de testigos de hielo de los glaciares o también de estalagmitas de las cavernas. Estos registros son como libros donde está escrita la historia del clima de la Tierra. Usando estos marcadores ambientales y gracias a los modelos climáticos a diferentes escalas espaciales y de tiempo, los investigadores buscan discriminar cual es la parte natural del cambio climático actual de la parte debida a la actividad humana y disminuir las incertidumbres en las proyecciones futuras del clima.

Francés

Changements climatiques de l'Holocène

Il existe une variabilité climatique naturelle. Elle est due aussi bien à des facteurs externes (comme le changement d'orbite de la Terre) qu'internes (comme les éruptions volcaniques ou les mouvements tectoniques entre autres). Les paléo-climatologues étudient les changements du climat du passé en réalisant des analyses complexes de sédiments de lacs, de carottes glaciaires ou encore de stalagmites des grottes. Ces registres sont comme des livres où est écrite l'histoire du climat de la Terre. A partir de ces marqueurs environnementaux et des modèles climatiques à différentes échelles d'espace et de temps, les chercheurs cherchent à connaître quelle part du changement climatique actuel est naturelle et quelle part est liée à l'activité humaine et réduire les incertitudes dans les projections climatiques.

Inglés

Holocene climatic changes

There is natural climate variability. It is due to both external factors (such as changes in Earth's orbit) as well as internal factors (such as volcanic eruptions and tectonic movements among others). Paleoclimatologists study historic climate changes performance by complex analysis of lake sediments, ice cores or stalagmite caves. These records are like books in where the history of Earth's climate has been written. Thanks to these environmental markers and the climate models at different scales of space and time, researchers seek to differentiate which part of the current climate change is natural and which part is due to human activity, in order to reduce uncertainties in future climate projections.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las conclusiones divulgadas en el 5º Informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el cambio climático -AR5 (IPCC) [1], se destaca aquella que manifiesta que los procesos que afectan el clima pueden presentar una variabilidad natural considerable, exhibiendo desde variaciones casi-periódicas hasta caóticas (que se dan de forma desordenada, sin seguir un patrón), en diferentes escalas tanto espaciales como temporales. Así, la variabilidad natural del clima ocurre dentro de un amplio espectro temporal, desde la escala de decenas/centenas de millares de años (Por ej.: a través de los periodos de ciclos glaciares e interglaciares) hasta la escala interanual (Por ej.: la variabilidad interna observada en El Niño Oscilación Sur - ENSO) e intranual (Por ej.: el ciclo de los Monzones en las regiones tropicales y subtropicales), resultando en múltiples estados del clima. Los cambios entre los estados del clima resultan de la variabilidad interna del complejo sistema climático, el cual presenta relaciones no lineales intrínsecas a sus componentes (la atmósfera, los océanos, los continentes, la criósfera y la biosfera) y también por la interacción entre ellos.

El sistema climático también es controlado por las respuestas del clima a procesos de retroalimentación (cuando un cambio inicial en el sistema del clima desencadena un proceso que, a su vez, influye en el cambio inicial, intensificándolo o disminuyéndolo) frente a agentes causantes de variaciones los cuales son denominados “forzantes” y que pueden ser de naturaleza externa al propio sistema (Por ej.: la variabilidad orbital y la actividad solar) como interna

(Por ej.: el vulcanismo, las tasas de CO₂, las circulaciones océano atmosféricas). La multiplicidad de estas interacciones revela la complejidad de la dinámica del sistema climático, cuyo entendimiento es crucial para la evaluación de los cambios en el clima relacionados a la acción del hombre o también llamados efectos antropogénicos (Por ej.: la emisión de los gases de efecto invernadero, cambios en las propiedades físicas de la superficie de la Tierra, aerosoles), y para generar herramientas que nos ayuden en la predicción del clima futuro. Finalmente el IPCC-AR5 confirma que probablemente la frecuencia e intensidad de los eventos extremos del clima se intensificará. Para establecer proyecciones de las frecuencias de ocurrencias de estos eventos extremos, se utilizan como herramienta a los modelos climáticos de alta resolución espacial y sobre un largo periodo temporal. Esto, debido a que los efectos de la variabilidad de una corta escala temporal (Por ej.: estacional e interanual), influyen en la variabilidad de baja frecuencia (Por ej.: decenal).

El IPCC-AR5 también indica la necesidad de ampliar el alcance de los estudios de observación del clima de la Tierra y que es necesario recuperar información paleo-climática (es decir sobre la variabilidad climática observada en el pasado), incluso en los periodos previos a las observaciones instrumentales. La reconstitución de la variabilidad del clima en el pasado se constituye como una poderosa herramienta para reducir la incertidumbre en los modelos climáticos actuales y para atribuir causas a los cambios observados en el período más reciente, ya que consideran mecanismos y variabilidades que se producen a grandes escalas temporales, los cuales

2 Cambios climáticos del Holoceno

que pueden servir de referencias para entender las tendencias actuales. En este contexto, se incluye la posibilidad de caracterizar la variabilidad inter-decadal (entre varias décadas), la cual es muy importante para la planificación de recursos hídricos en el mediano y largo plazo [2], siempre y cuando los registros paleo-climáticos sean validados por los datos instrumentales en periodos recientes. De esta manera se espera mejorar el rendimiento de los modelos climáticos (IPCC-AR5, Capítulo I) [3]. Por todas estas razones, y en reconocimiento del papel clave que la agregación de los datos paleo-climáticos puede tener para mejorar el rendimiento de los modelos predictivos, el IPCC-AR5 ha incorporado definitivamente un capítulo enteramente dedicado a las reconstrucciones de los mecanismos y la variabilidad del clima pasado (IPCC-AR5, Capítulo V) [4].

Informaciones paleo-climáticas muestran claramente que el clima de la Tierra varía en diferentes escalas temporales y espaciales, y fue modulado por diferentes forzantes climáticos externos, como variaciones en la órbita terrestre y la actividad solar relacionada, pero también por forzantes internas, como los procesos de vulcanismo, los cambios en la concentración de los gases de efecto invernadero (principalmente el CO_2), en la concentración y calidad del material particulado atmosférico (los productos de

La reconstitución de la variabilidad del clima en el pasado se constituye como una poderosa herramienta para reducir la incertidumbre en los modelos climáticos actuales.

la quema, el polvo, etc.), los procesos biogeoquímicos y todas las retroalimentaciones asociadas (es decir los procesos internos que amplifican o disminuyen la respuesta climática a un forzamiento inicial como el incremento de vapor de agua y nubes posterior al incremento de la concentración de CO_2 por ejemplo).

En la medida en que los modelos climáticos pueden simular los cambios climáticos del pasado, así como su variabilidad intrínseca, es posible suponer que estos modelos tienen la capacidad de predecir el clima futuro de la Tierra. Esfuerzos internacionales de inter-calibración de modelos acoplados océano-atmósfera (modelos que tienen la capacidad de integrar y simular variaciones tanto en regiones atmosféricas como oceánicas) se han realizado con el fin de reducir las incertidumbres en la representación del clima pasado y actual. Programas como CMIP (del Inglés Coupled Model Intercomparison Project: CMIP5) y PMIP (del inglés Paleoclimate Model Intercomparison Project: PMIP 3) están diseñados para enfrentar estos problemas, a pesar de que todavía se consideran abiertos para insertar funciones y representaciones físicas que ayuden a la descripción de las diferentes variabilidades. Los estudios basados en modelos climáticos simplificados y en modelos climáticos regionales deben contribuir a la comprensión de los resultados obtenidos con los complejos modelos de CMIP5 utilizados en el IPCC-AR5.

El análisis de las simulaciones del clima global nos permite entender los mecanismos clave que actúan sobre el clima de América del Sur, tales como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT,

2 Cambios climáticos del Holoceno

cinturón de baja presión que ciñe el globo terrestre en la región ecuatorial), la convergencia de larga escala en la Amazonía, la corriente de chorro de bajo nivel al este de los Andes (del inglés Low level Jet) y la Zona de convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) que en conjunto forman el Sistema de Monzón Sudamericano (SMSA). Este sistema modula tanto el clima medio, como la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos en la mayoría del continente. Otros tipos de sistemas, como los complejos convectivos de meso-escala y los friajes juegan también un papel importante en la modulación de la ocurrencia de fenómenos extremos. Las simulaciones ayudarían por otro lado a comprender las retroalimentaciones y los impactos de la variabilidad de estos sistemas en los ecosistemas continentales y marinos y las adaptaciones asociadas. Además, los sistemas climáticos están conectados con los sistemas de circulación oceánica, donde los fenómenos de meso-escala y de variabilidad interanual, como la migración del sistema de Alta Presión de la Atlántico Sur (APAS), juegan un papel fundamental en la oscilación del clima de América del Sur y pueden afectar significativamente a las zonas con Alto índice de vulnerabilidad Socio-climática- IVSC [5].

Cambios durante el Holoceno

En la escala de tiempo geológica, El Holoceno corresponde a la época del período Cuaternario de la era Cenozoica que se inicia hace más o menos 11,5 mil años e incluye la época presente.

En América del Sur, el Holoceno Inferior y Medio se caracterizaron por un cambio natural del

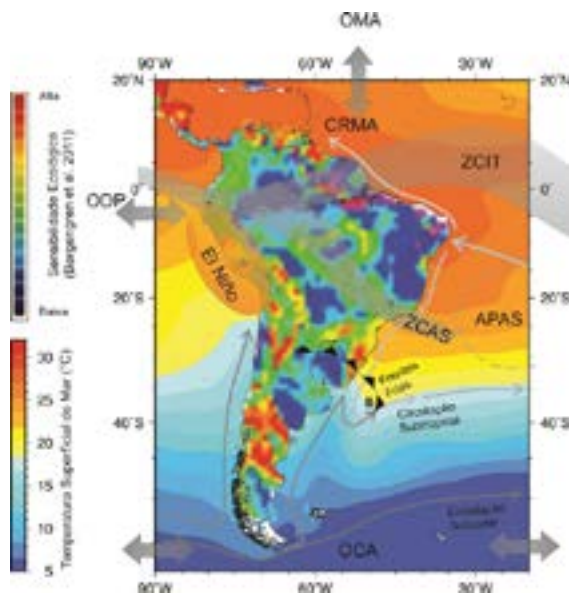


Figura 1: El mapa de sensibilidad ecológica de América del Sur [6] considera los impactos de la variabilidad climática de 10 simulaciones presentadas en el AR4 del IPCC en los ecosistemas continentales, donde se presentan las áreas de mayor impacto potencial en colores cálidos y con menos potencial con colores fríos. Superpuesta en el mapa continental, la zona del océano está representada por la temperatura superficial media (°C) basado en 30 años de observación por teledetección del programa de la NASA Pathfinder. Procesos atmosféricos definidos aquí y sus áreas de cobertura son: la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical), ZCAS (Zona de Convergencia del Atlántico Sur), APAS (Alta Presión del Atlántico Sur) y CRMA (Recuperación de Circulación del Atlántico Meridional) así como la principal vía de entrada de los sistemas de baja presión atmosférica y las latitudes de los sistemas de circulación subtropicales y subantárticas. El área de mayor influencia de El Niño, también está limitada, así como las oscilaciones de periodo largo como la ODP (Oscilación Decadal del Pacífico de Océano), OCA (Onda Circumpolar Antártica) y OMA (Oscilación Multidecadal del Atlántico).

clima debido a las variaciones en los parámetros orbitales (la excentricidad de la órbita terrestre, la inclinación de la Tierra, o el movimiento del su eje de rotación). La variación de estos parámetros orbitales

2 Cambios climáticos del Holoceno

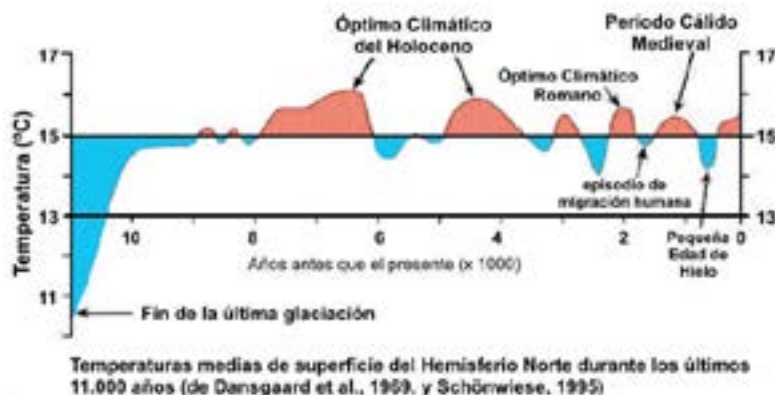


Figura 2. El periodo del Holoceno representado a través de la variación de la temperatura media del Hemisferio Norte. A partir de <http://www.mitosyfraudes.org/Calen9/Hamlin-1.html>

modifica constantemente la posición y la exposición de la Tierra al Sol, generando una fuerte variabilidad climática. De esta manera, durante el Holoceno Inferior y Medio había un clima más seco que el promedio actual en las latitudes tropicales. Esta condición parece estar al menos en parte asociada con una disminución de insolación de verano en el hemisferio sur durante el período (entre 12000 y 5000 años antes del presente). Este hallazgo se basa principalmente en la evidencia de niveles muy bajos del Lago Titicaca (Bolivia) [7,8], así como en los registros de un gran contenido de polvo en testigo del glaciar Sajama, lo que indica un clima más árido de los Andes tropicales [9]. Para este mismo período los estudios paleo-climáticos mostraron bajos niveles de los lagos en Brasil [10], una alta frecuencia de incendios en la Amazonía [11,12], una apertura de la vegetación en el sureste de Brasil, con un impacto directo en el Bosque Atlántico [13], que mostró un clima significativamente seco de la parte central y oriental del continente sudamericano. Sin embargo, el estudio de testigos lacustres (muestras

de los sedimentos depositados en el fondo del lago) de Carajás-PA (Brasil) indica también sobre paleo-incendios en la Amazonía, los cuales serían el reflejo de varios episodios secos intercalados por fases húmedas, lo que sugiere una mayor variabilidad en las escalas interanuales e interdecenal de las precipitaciones en la Amazonía [12,14]. Las reconstrucciones paleo-hidrológicas de lagunas de inundación del Amazonas, realizada por Moreira et al. [15] también mostraron una fuerte correlación con la determinación de los periodos húmedos y secos en los últimos 10 000 años para la Cuenca del Amazonas.

El Holoceno Medio se encuentra caracterizado por condiciones climáticas marcadas de máxima insolación en el hemisferio norte, es decir que la principal forzante está relacionada a los parámetros orbitales. El estudio de este periodo de tiempo se considera por lo tanto interesante y necesario para avanzar en la comprensión de cómo los modelos climáticos responden a los cambios en la insolación,

2 Cambios climáticos del Holoceno

con diferentes condiciones de contorno (aquellas que definen el comportamiento del modelo en sus límites) mantenidas aproximadamente de manera constante (Por ej : el tamaño de los glaciares, el nivel del mar, la concentración de gases de efecto invernadero). Así, un estudio del comportamiento y de la capacidad del modelo para simular las características de gran escala en el Holoceno Medio, permitirá la comprensión de los mecanismos responsables del cambio climático del pasado, lo que sin duda contribuirá en gran medida a la comprensión de las posibles predicciones del clima futuro.

Cambios climáticos de los 2 últimos Milenios

Durante los últimos 2000 años, América del Sur ha pasado por cambios en los patrones de distribución de las precipitaciones durante la Anomalía Climática Medieval (~900-1 200 años d.C.), conforme a los registros paleo-climáticos obtenidos en regiones tropicales y subtropicales del continente. Esta deducción se realiza a partir del estudio de las variaciones en los

valores de isótopos estables de oxígeno ($\delta^{18}O$) en las estalagmitas (formaciones calcáreas depositadas a partir del agua de infiltración en cavernas), en carbonatos de sedimentos lacustres, y de testigos de Hielo. El análisis de estas formaciones geológicas muestra que, durante el periodo referente a la Anomalía Climática Medieval, la variabilidad del clima se caracterizó por una disminución de las precipitaciones en la Amazonía occidental, incluyendo los Andes [17,18,19,20] y acompañada de cambios en los patrones de circulación en el Pacífico Sudeste y el Indo-Pacífico [21,22]. Estos resultados indican que estos cambios condujeron a la reorganización de la circulación de los océanos y de la atmósfera favoreciendo la aparición de modos de variabilidad decenal y multidecenal del Atlántico Norte, que debería haber producido efectos en el sistema climático de América del Sur como es sugerido por estudios del clima en periodos más recientes [23].

El período de la Anomalía Climática Medieval fue seguido por la época fría del Hemisferio Norte,

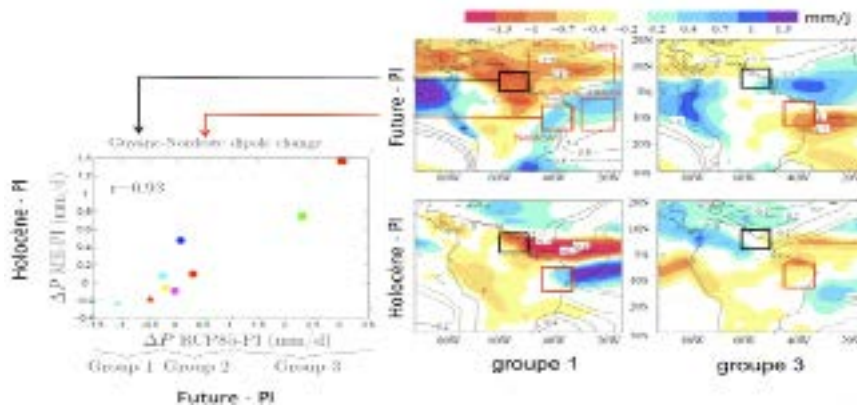


Figura 3: Comparación entre las simulaciones de las diferencias de precipitaciones anuales para el clima pasado (6000 años antes del presente) y futuro (RCP85 IPCC) para 9 modelos CMIP5 mostrando que las anomalías en la posición de la ZCIT reproducidas por cada grupo de modelos son relacionadas en el pasado y en el futuro. Los datos paleoclimáticos indican más precipitaciones en el Nordeste de Brasil durante el Holoceno medio lo que corresponde a los modelos del grupo 1. [16].

2 Cambios climáticos del Holoceno

conocida como la Pequeña edad de Hielo (~1350-1850 años d.C.). Los pocos estudios realizados abarcando este período en la región de América del Sur mostraron una distribución coherente de precipitación. En la parte

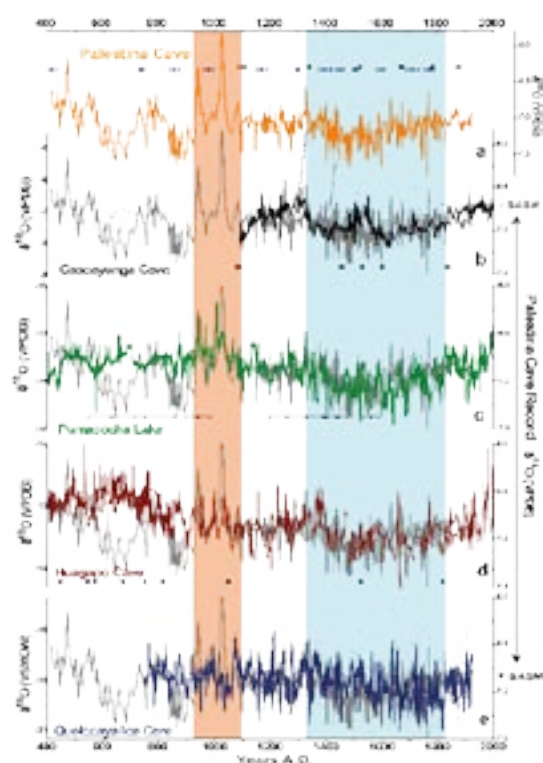


Figura 4: Comparación entre los registros paleo-climáticos basados en indicadores isotópicos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$), donde se observa el comportamiento regional de las precipitaciones durante los periodos climáticos relacionados a la Anomalía Climática Medieval (Barra Naranja) y la Pequeña edad de Hielo (Barra Celeste). De arriba hacia abajo: a) Registro de la cueva de Palestina [17]; b) Registro de la caverna de Cascayunga [14]; c) Registro de la Laguna Pumacochas [15]; d) Registro de la cueva de Huagapo [21]; e) Registro del Glaciar Quelccaya [22]

norte de América del Sur, los registros de concentración de titanio (Ti) en la cuenca de Cariaco (Venezuela) sugieren un aumento de la aridez [24], mientras que los registros del Sistema de Mozón Sudamericano (SMSA)

indican un escenario opuesto. Registros lacustres [18,25], de testigos de hielo [26] y estalagmitas [17,20] indican mayor precipitación e incremento de la cobertura glaciaria durante la Pequeña edad de Hielo (Fig. 4). Estos cambios registrados durante la Pequeña edad de Hielo pueden haber sido causados por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, producido por mecanismos globales relacionados con la reducción de la temperatura de la superficie del Atlántico Norte en respuesta a la reducción de la oscilación de temperaturas del Atlántico Sur AMO- [27,28]. Los cambios a largo plazo en las precipitaciones en el noreste de Brasil, que indican un clima más seco durante la Pequeña edad de Hielo, pueden haber sido influenciados por fuertes cambios en la circulación zonal en niveles altos de la atmósfera [29], como aquellos descritos para el Holoceno por Cruz et al. [30]. Tales patrones de variación regional en la circulación atmosférica y distribución de las precipitaciones han sido bien reproducidos por experimentos numéricos basados en modelos de circulación general, y en simulaciones que integran variaciones en la composición isotópica de la lluvia. Estudios recientes llevados a cabo en la Amazonía Occidental [17] demostraron que durante la Pequeña edad de Hielo, hubo un aumento de alrededor del 30% de la precipitación en relación al periodo actual, esto debido a la intensificación del Sistema de Mozón Sudamericano. Estos resultados proporcionan evidencia de que el escenario publicado por Cruz et al. [30] parece ser similar a las situaciones encontradas durante la Pequeña edad de Hielo, que podrían conducir a una intensificación de los monzones y anomalías positivas de las lluvias en la parte occidental de la región

Amazónica (es decir más lluvias) y negativas en el Nordeste de Brasil (es decir menos lluvias) [31]. Estos patrones de circulación atmosférica regional y de precipitación deben originar, según el escenario actual, una variedad de efectos en los ecosistemas continentales, costeros y marinos.

CONCLUSIONES

Al estudiar los dos últimos milenios, marcados por pequeñas variabilidades en términos de forzantes externos (erupciones volcánicas, actividad solar, gases de efecto invernadero, etc.) y en términos de variabilidad climática, intentamos entender cual es la sensibilidad climática actual y futura en función de estos forzantes (a través de los modelos CMIP5) y estudiar los mecanismos fundamentales que controlan la variabilidad climática (a través de los modelos simplificados del sistema climático terrestre). Este conocimiento, principalmente basado en las reconstrucciones paleo-climáticas, ayudara a una mejor comprensión del sistema y nos otorgara mejores evidencias de las variaciones naturales del ambiente. Por otro lado, es pertinente mencionar que las reconstrucciones paleo-climáticas en Sudamérica tropical son bastante limitadas y en algunos casos representan condiciones locales específicas. Es necesario empujar y motivar este tipo de estudios para poder generar un panorama amplio de las respuestas de los ambientes a las variaciones climáticas de distintas escalas temporales. Este conocimiento puede ser de mucha utilidad en la reconstrucción de la historia humana con el ambiente y aplicar estas experiencias en la planificación de los recursos.

REFERENCIAS

1 - IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

2 - Grimm, A.M., & Saboia, J.P.J. 2014. Interdecadal Variability of the South American precipitation in the Monsoon Season. *Journal of Climate*. Doi: 10.1175/JCLI-D-14-00046.1

3 - Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: - *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

4 - Masson-Delmotte, V., M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J.F. González Rouco, E. Jansen, K. Lambeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner, T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao and A. Timmermann, 2013: Information from Paleoclimate Archives. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

5 - Samson, J., Berteaux, D., McGill, B. J., & Humphries, M. M.. Geographic disparities and moral hazards in the predicted impacts of climate changes in human populations. *Global Ecology and Biogeography*, 20 (4), 532-544. Doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00632.x, 2011.

6 - Bergengren, J. C., Waliser, D. E., & Yung, Y. L. 2011. Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic Change*, 107(3-4), 433-457. doi:10.1007/s10584-011-0065-1, 2011

7 - Mourguiart, P., Corregé, T., Wirmann, D., Argollo, J., Montenegro, M.E., Pourchet, M., Carbonel, P., Holocene palaeohydrology of Lake Titicaca estimated from an ostracod-based transfer function. *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 143, 5172, 1998.

2 Cambios climáticos del Holoceno

8 - Abbott, M., Wolfe, B., Wolfe, a, Seltzer, G., Aravena, R., Mark, B., Polissar, P., Rodbell, D., Rowe, H. and Vuille, M.: Holocene paleohydrology and glacial history of the central Andes using multiproxy lake sediment studies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1-3), 123–138, doi:10.1016/S0031-0182(03)00274-8, 2003.

9 - Thompson, L. G.: A 25,000-Year Tropical Climate History from Bolivian Ice Cores, *Science*, 282(5395), 1858–1864, doi:10.1126/science.282.5395.1858, 1998.

10 - Turcq, B., Albuquerque, A.L.S., Cordeiro, R.C., Sifeddine, A., Simões Filho, F. F.L.A., Souza, G., Abrão, J.J., Oliveira, F.B.L., Silva, A.O., Capitâneo, J.A., Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology* 148, 319–342, 2002.

11 - Sifeddine, A., Bertrand, Ph., Fournier, M., Martin, L., Servant, M., Suguio, K., Turcq, B., La sedimentation organique lacustre en milieu tropical humide (Carajás Amazonie orientales, Brésil) : relation avec les changements des 60 000 dernières années. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 165, 613-621, 1994.

12 - Sifeddine, A., Martin, L., Turcq, B., Volkemer-Ribeiro, C., Soubies, F., Cordeiro, R.C., Suguio, K., Variations of the Amazon rainforest environment: a sedimentological record covering 30,000 years. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 168, 221-235, 2001.

13 - Ledru, M.-P., Late Quaternary environment and climatic changes in central Brazil. *Quaternary Research* 39, 9098, 1993.

14 - Turcq, B., Sifeddine, A., Martin, L., Absy, M.L., Soubies, F., Suguio, K., Volkmer-Ribeiro, C., Amazonian rainforest fires: a lacustrine record of 7000 years. *Ambio*, 27, 139–142, 1998.

15 - Moreira, L.S., Moreira-Turcq, P., Cordeiro, R.C., Turcq, B., Caquineau, S., Viana, J.C.C., Brandini, N.. Holocene paleoenvironmental reconstruction in the Eastern Amazonian Basin: Comprido Lake In *Journal of South American Earth Sciences.* , v.44, 55-2, 2013.

16 - Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., ... Olosio, A. O. (2014). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* contributions to the CMIP5 archive, 141–184. doi:10.1002/2013MS000265.
Received

2 Cambios climáticos del Holoceno

17 - Reuter, J., Stott, L., Khider, D., Sinha, A., Cheng, H., Edwards, R. L.: A new perspective on the hydroclimate variability in northern South America during the Little Ice Age. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21706, doi:10.1029/2009GL041051, 2009.

18 - Bird, B. W., Abbott, M. B., Vuille, M., Rodbell, D. T., Stansell, N. D. and Rosenmeier, M. F.: A 2,300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes, *P. Natl Acad Sci.*, 108, 8583-8588, 2011.

19 - Vuille, M., Burns, S. J., Taylor, B. L., Cruz, F. W., Bird, B. W., Abbott, M. B., Kanner, L. C., Cheng, H., Novello, F.: A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Clim. Past*, 8, 1309–1321. doi:10.5194/cp-8-1309-2012, 2012.

20 - Apaéstegui, J., Cruz, W., Sifeddine, A., Espinoza, J. C., Guyot, J. L., Khodri, M., Strikis, N., Santos, R. V., Cheng, H., Edwards, L., Carvalho, E., Santini, W.: Hydroclimate Variability of the South American Monsoon System during the last 1600 yr inferred from speleothem isotope records of the north-eastern Andes foothills in Perú, *Clim. Past Discuss.*, 10, 533-561, 2014, doi:10.5194/cpd-10-533-2014.

21 - Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R. S., Hughes, M. K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F.: Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly, *Science*, 326, 1256–1260, 2009.

22 - Graham, N. E., Ammann, C. M., Fleitmann, D., Cobb, K. M. and Luterbacher, J.: Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly”, *Clim. Dynam.*, 37, 1217–1245, doi:10.1007/s00382-010-0914-z, 2010.

23 - Robertson, A. W., Mechoso, C. R.: Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America, *J. Climate*, 11: 2570–2581, 1998.

24 - Haug, G. H., Hughen, K., Sigman, D. M., Peterson, L. C. and Röhl, U.: Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene, *Science*, 293, 1304–1308, 2001.

25 - Baker, P. a, Seltzer, G. O., Fritz, S. C., Dunbar, R. B., Grove, M. J., Tapia, P. M., Broda, J. P. The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years. *Science (New York, N.Y.)*, 291(5504), 640–3. doi:10.1126/science.291.5504.640, 2001

26 - Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Dansgaard, W., and Grootes, P. M.: The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya Ice Cap, *Science*, 234, 361–364, 1986.

27 - Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Field, D. B., Ortlieb, L., Vargas, G., Chávez, F. P., Velazco, F., Ferreira, V., Tapia, P., Salvattecí, R., Boucher, H., Morales, M. C., Valdés, J., Reyss, J.-L., Campusano, A., Boussafir, M., Mandeng-Yogo, M., García, M., and Baumgartner, T.: Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age, *Bio-geosciences*, 6, 835–848, doi:10.5194/bg-6-835-2009, 2009.

28 - Licciardi, J. M., Schaefer, J. M., Taggart, J. R., & Lund, D. C.. Holocene glacier fluctuations in the Peruvian Andes indicate northern climate linkages. *Science (New York, N.Y.)*, 325(5948), 1677–9. doi:10.1126/science.1175010, 2009.

29 - Zocatelli, R., Boussafir, M., Cordeiro, R.C., Disnar, J.R., Costa, R.L., Sifeddine, A., Albuquerque, A.L.S., Bernardes, M.C., Jacob, J. Late Holocene paleoenvironmental changes in Northeast Brazil recorded by organic matter in lacustrine sediments of Lake Boqueirão In *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.*, v.363-364, 127-134, 2012.

30 - Cruz, F. W., Vuille, M., Burns, S. J., Wang, X., Cheng, H., Werner, M., Nguyen, H.. Orbitally driven east–west antiphasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, 2(3), 210–214. doi:10.1038/ngeo444, 2009.

31 - Novello, V. F., Cruz, F. W., Karmann, I., Burns, S. J., Stríkis, N. M., Vuille, M., ... Barreto, E. a. S.. Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophysical Research Letters*, 39(23), n/a–n/a. doi:10.1029/2012GL053936, 2012.