

Geocronología de terrazas marinas en la costa sur-peruana: Enfoque metodológico

L. ORTLIEB¹, B. GHALEB², C. HILLAIRE-MARCEL², J. MACHARE³ & P. PICHET²

Estudios de Terrazas Marinas

Objetivos

El objetivo principal de los estudios de terrazas marinas emergidas es determinar las características y modalidades de los movimientos verticales de la corteza terrestre durante los últimos cientos de miles de años. Idealmente, el análisis de la disposición geométrica actual de las líneas de costa cuaternarias permite cuantificar la velocidad de levantamiento de las áreas costeras, determinar las variaciones de estas tasas de surrección en el transcurso del tiempo, y poner en evidencia el estilo de las deformaciones corticales (levantamiento continuo o por sacudidas cósmicas, juego de fallas, etc.). En la práctica, estas metas son alcanzadas únicamente para el período que cubre los últimos 200,000 ó 250,000 años. Las principales restricciones se deben, tanto a la dificultad de reconstituir la posición original del nivel del mar cuando se formaron cada una de las terrazas del Pleistoceno, como a una serie de limitaciones en cuanto a fechamiento de las líneas de costa.

Métodos geocronológicos

Para el estudio cronológico de las terrazas marinas, disponemos de diversos métodos. Los únicos que pueden pretender arrojar "edades absolutas" son los métodos radiométricos basados en los fenómenos de desintegración atómica: ^{14}C , $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Los demás, como la aminoestratigrafía (basada en tasas de racemización de amino-ácidos), la termoluminiscencia, o el método "ESR" ("Electron Spin Resonance" = resonancia electromagnética del electrón) constituyen métodos de cronología relativa, y por lo tanto necesitan ser calibrados en cada región.

Los métodos radiométricos fundados sobre el decrecimiento radioactivo de la familia del uranio permiten teóricamente calcular edades de varios cientos de miles de años pero la espectrometría α normalmente usada para medir las proporciones relativas de los distintos radioisótopos limita de hecho el rango accesible de este método a los últimos 250,000 años. Sin embargo, la nueva tecnología basada en espectrometría de masa abre nuevos horizontes ya que permitirá extender significativamente este rango, y al mismo tiempo mejorar la precisión de las mediciones (Edwards et al., 1987a, 1987b).

- (1) Mission ORSTOM au Pérou (Inst. Franç. Rech. Scient. Dével. en Coop.), Apartado 18-1209, Lima 18, Peru
- (2) Laboratoire GEOTOP, Université du Québec à Montréal, Case 8888, succ. A, Montréal, H3C 3P8, Québec Canada
- (3) Instituto Geofísico del Perú, Apartado 3747, Lima 100, Perú

O.R.S.T.O.M. Fonas Documentaire

N° : 34.903 ex 1

Cpte : B

Las fluctuaciones del nivel del mar

Después de numerosos estudios morfoestratigráficos y geocronológicos realizados en regiones con distintos comportamientos tectónicos, se ha reconstituido la posición del geóide durante las fases de alto nivel marino del Pleistoceno superior. En el caso de los máximos interglaciales anteriores al estadio isotópico 7, se infiere la posición del nivel del mar utilizando datos isotópicos de núcleos oceánicos (Shackleton & Opdyke, 1973, 1976; Shackleton 1987; Martinson et al., 1987). La determinación de las posiciones sucesivas del nivel marino, a una escala global, debe apoyarse sobre datos de diversas regiones, lo que justifica multiplicar los estudios de terrazas del Cuaternario, en particular las del Pleistoceno medio (Ortlieb, 1987, 1988). Desde este punto de vista, las áreas costeras sometidas a levantamientos constantes y regulares, donde fueron preservadas secuencias de terrazas marinas escalonadas y bien definidas, merecen ser estudiadas en prioridad. La costa peruana cumple con estos requisitos y empieza a ser objeto de investigaciones en este campo.

Metodología de estudios regionales

Las interpretaciones cronoestratigráficas de conjuntos de terrazas reposan sobre análisis morfoestratigráficos y altimétricos y sobre una clara identificación de las líneas de costa de los episodios de alto nivel marino del Pleistoceno superior (E.I. 5). En los estudios regionales, entonces, se focalizan las determinaciones geocronológicas sobre las líneas de costa más recientes. Luego, en los casos favorables, se puede intentar compensar la falta de datos radiocronológicos sobre las terrazas anteriores a 250,000 años, usando a la vez, métodos de cronología relativa como la aminoestratigrafía, consideraciones geométricas (espaciamiento vertical entre terrazas) y extrapolaciones de tasas de levantamiento local (Ortlieb, 1987; Goy et al., en prensa; Ortlieb & Macharé, en prensa).

Estudios cronológicos en el sur del Perú

Trabajos anteriores

Las terrazas marinas pleistocenas del sur del Perú han sido descritas en el marco de algunos estudios específicos (Broggi, 1946; Laharie, 1970), y por los autores de los cuadrángulos que abarcan las regiones costeras al sur del paralelo 16S. Más recientemente, se ha manifestado mayor interés por estas geoformas (Macharé & Huaman, 1982; Macharé, 1987), y su fechamiento (Hsu, 1988; Hsu et al., 1989; Ortlieb et al., 1990a).

Los primeros estudios geocronológicos efectuados en las terrazas marinas peruanas mostraron varias dificultades inherentes a los métodos empleados y/o relacionadas con algunas particularidades de la costa peruana, como la ausencia de material coralino (lo que obliga a usar el método U/Th sobre conchas de bivalvos), o las temperaturas relativamente altas experimentadas por el desierto costero (lo que limita el rango accesible por aminoestratigrafía). A raíz de estos problemas, los primeros análisis geocronológicos, obtenidos en la región de San Juan Marcona, han producido resultados contradictorios. En la famosa secuencia de terrazas de Cerro el Huevo (Broggi, 1946), se ha atribuido una edad de 125 ka (subestadio 5e) primero a la terraza de +148 m (Hsu y Bloom, 1985), luego a la de +105 m (Hsu et al., 1987) y finalmente a la de +65 m (Hsu, 1988; Hsu et al., 1989). Estas diferentes interpretaciones publicadas reflejan la dificultad de coordinar los resultados de diferentes métodos, cuando no existe localidad de referencia que permita alguna calibración.

La interpretación aminoestratigráfica de J. Hsu

Las investigaciones geocronológicas de Hsu (Hsu, 1988; Hsu et al., 1989) se concentraron sobre las terrazas marinas entre 14 y 15°30'S, y en particular el área de San Juan Marcona, pero incluyeron también algunas localidades del área de Ilo. Después de haber probado varios métodos, Hsu (1988)

concluye que los métodos U/Th y ESR aplicados a conchas de moluscos de la costa peruana tienen una utilidad limitada, a diferencia del método aminoestratigráfico, más adaptado a las condiciones locales. La escala aminoestratigráfica propuesta por este autor (Hsu, 1988; Hsu et al., 1989) consta de seis aminozonas (calculadas par la especie *Mulinia*), numeradas de I a V y correlacionadas de la manera siguiente:

Aminozona I :	0.27	E.I. 3/5a	60,000 ka (?)
Aminozona IIa:	0.44 (0.44)	E.I. 5e	125,000 ka
Aminozona IIb:	0.55 (0.55)	E.I. 7	210,000 ka
Aminozona III:	0.63 (0.64)	E.I. 9	280,000 ka
Aminozona IV :	0.78 (0.86)	E.I. 11/13	470,000 ka
Aminozona V :	1.02	E.I. 19/21/23	880.000 ka

(Los valores entre parentesis figuran las aminozonas calculadas en la región de Ilo, según Hsu et al., 1990). El marco cronológico indicado de las aminozonas fue fijado en base a una serie de resultados ESR, una correspondencia entre valores de tasas de racemización (así como entre temperaturas ambientales) entre las costas de California y las del sur peruano, y algunas consideraciones geomorfológicas.

Estudios en curso

Independientemente del trabajo de Hsu y colaboradores, se emprendió otro programa geocronológico de las terrazas marinas del sur del Perú. Este programa combina también mediciones radiométricas (U/Th, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^{14}C) y análisis aminoestratigráficos, e incluye además estudios de la composición isotópica (^{18}O y ^{13}C) y de la mineralogía (RX) de cada una de las muestras de bivalvos analizadas (Ortlieb et al., 1990). Las tres áreas seleccionadas por los escalonamientos de terrazas marinas que presentan, son las de Ilo, Chala y San Juan-Marcona. Este segundo programa, no concluido aún, llega a conclusiones distintas a las del autor anteriormente mencionado.

En Ilo, destaca una amplia terraza, de más de 20 km de largo y 1 km de ancho (Pampa del Palo) que llega a una altura máxima de +25 m. Además de este rasgo imponente, existen varias huellas de episodios anteriores de alto nivel marino, a alturas de +40, +50, +60 y +70 (correspondientes a un mismo episodio), +120, +160 m (Goy et al., 1990).

En Chala, donde una secuencia de más de veinte líneas de costa sucesivas están escalonadas hasta +240 m (Laharie, 1970; Goy et al., 1990, en prensa), las geoformas litorales y depósitos atribuibles al Pleistoceno superior son particularmente bien desarrollados y alcanzan una altura de +69 m.

En San Juan-Marcona, está preservada una secuencia de terrazas de abrasión marina muy espectacular que se extiende hasta una altura máxima de +780 m (Broggi, 1946; Macharé, 1987; Hsu, 1988; Ortlieb & Macharé, 1990; Macharé & Ortlieb, en prensa). Como ya se mencionó, no ha quedado bien establecido cuál es la terraza de abrasión formada durante el subestadio 5e: en base a argumentos esencialmente morfológicos, interpretamos que es la de +105 m (Ortlieb & Macharé, en prensa).

Para obtener resultados confiables, se está dando énfasis en la representatividad de las determinaciones geocronológicas, tanto a nivel de las localidades estudiadas (selección de las conchas, número mínimo de muestras, combinaciones de especies), como a nivel de las muestras (geoquímica isotópica, control mineralógico).

La aplicación de los métodos radiométricos a moluscos fósiles requiere un cierto control sobre las complejas migraciones de radio-isótopos que suelen ocurrir en este tipo de material. Ello conlleva a realizar numerosos análisis antes de poder validar las edades aparentes calculadas. Así, en el caso de Pampa del Palo (Ilo), siete muestras proveen datos compatibles con una edad del orden de 120 ka (subestadio 5e). Por otra parte, en la misma región de Ilo, la combinación de los datos geoquímicos relativos a muestras de las terrazas anteriores, permite distinguir tres episodios de alto nivel marino del Pleistoceno medio.

Los datos aminoestratigráficos acumulados hasta ahora conciernen a más de 130 muestras (Tabla 1). La interpretación cronoestratigráfica de estos resultados, resumida en la última columna de la

Tabla 1: Datos aminostratigráficos sobre terrazas marinas del sur peruano e interpretación cronológica propuesta

Región	Localidad (altura máxima)	N° muestra	Género bivalvo anal.	Tasa Allo/Iso		Equiv. Mul.(1)	Interpret. (E.I.)
				# ind.	Promedi (Sigma)		
San Juan Marcona 15°30' S	Z. naval SJ (+20 m)	P.150	Ameghinomya a.	3	0.46 (0.019)	0.46	5 a
	Km 4 E San Juan (+40 m)	P.72	Mulinia	3	0.64 (0.049)	0.64	5 e retra- -bajado ?
			Eurhomalea l.	1	0.78	0.60	
	Puente carretera a San Nicolás (+30 m)	P.376	Ameghinomya a.	1	0.51	0.51	5 c
		P.375	Mulinia	1	0.51	0.51	
	Co.El Huevo (+90 m)	P.377/8	Eurhomalea r.	5	0.53 (0.031)	0.39?	(5 e ?)
		E Aeropuerto SJ (+65 m)	P.151	Eurhomalea l.	3	0.81 (0.022)	0.63
Mulinia	3			0.68 (0.047)	0.68		
E Apto. SJ (+100 m)	P.73	Mulinia	3	0.78 (0.045)	0.78	7	
Chala 16° S	Qda. Huanca (+20 m)	P.108	Eurhomalea r.	6	0.57 (0.025)	0.42	5 a
			Eurhomalea l.	3	0.61 (0.070)	0.46	
	Qda. Honda (+25 m)	P.155	Eurhomalea l.	7	0.64 (0.127)	0.49	5 c
	Qda. Higuierón (+20 m)	P.123	Mulinia	3	1.08 (0.032)	R	> 9 ?
			Eurhomalea l.	1	1.07	(0.85)	
	O de Cali (+140 m)	P.118	Mesodesma	2	1.17 (0.128)	R	
			Protothaca	3	0.91 (0.012)	0.91	9
SE de Cali (+160 m)	P.26	Mulinia	3	1.09 (0.021)	R	11	
		Mesodesma	3	1.17 (0.012)	R		
Qda. Chala (+160 m)	P.344	Mesodesma	3	1.07 (0.076)	(1.07)	11	
Ilo 17°45' S	Cantera O Pampa del Palo (+15 m)	P.127	Eurhomalea l.	3	0.68 (0.111)	0.52	5 c ?
			Mesodesma	9	0.52 (0.080)	0.52	
			Mulinia	9	0.55 (0.084)	0.55	
	SP. Palo (+20 m)	P.6	Mulinia	3	0.61 (0.024)	0.61	5 e
	Cantera NE Pampa del Palo (+20 m)	P.162	Mulinia	3	0.60 (0.035)	0.60	5 e
			Eurhomalea r.	3	0.77 (0.052)	0.60	(+7 retra- -bajado ?)
	NE Pampa del Palo (+35 m)	P.14	Mesodesma	3	1.12 (0.036)	R	11 ?
Eurhomalea r.			2	1.26 (0.042)	R		
NE Pampa del Palo (+60 m)	P.10	Mulinia	4	1.03 (0.149)	R	9 ?	
NE Pampa del Palo (+70 m)	P.164	Eurhomalea l.	3	0.95 (0.024)	(0.74?)		
		Mulinia	5	1.00 (0.197)	(0.79?)	9 ?	
				0.96 (0.100)	0.96		

(1) Equivalente Allo/Iso Mulinia = $(0.79 \cdot (A/I \text{ Eurhomalea})^{1.1})$

(R) Muestras racémicas

(E.I.) Estadio isotópico (interglaciales del Pleistoceno medio y superior)

Tabla 1, reposa sobre un amplio conjunto de observaciones morfoestratigráficas. Tanto a nivel local (variaciones interespecíficas en cada localidad, orden stratigráfico), como a escala inter-regional, destaca una coherencia general de las interpretaciones cronológicas propuestas. En tres casos solamente, se ponen en evidencia removilizaciones de conchas de episodios transgresivos anteriores. Algunas discrepancias aparentes en muestras de terrazas antiguas están atribuidas al carácter probablemente no-lineal, en el transcurso del tiempo, de la ecuación de correspondencia inter-específica *Mulinia/Eurhomalea* utilizada aquí (ecuación empírica calculada por Hsu, 1988; ver Tabla 1).

Conclusión

La interpretación del conjunto de datos obtenidos a la fecha sobre las terrazas marinas del sur peruano discrepa de aquella propuesta por Hsu y colaboradores (Hsu, 1988; Hsu et al., 1989). En los estudios aminoestratigráficos, una parte de las discrepancias proviene de las diferencias en los protocolos de laboratorio, lo que se manifiesta por el hecho que "nuestros" valores de tasa Allo/Iso-leucina son ligeramente más elevados que los obtenidos en el laboratorio de J. Wehmiller. Pero, más allá de estas diferencias numéricas, resalta un importante desacuerdo en los marcos cronoestratigráficos asignados a las aminozonas. En áreas como la de Ilo, donde correlacionamos depósitos o terrazas con los tres subestadios del último interglacial (5e, 5c y 5a), Hsu (op.cit.) interpreta que éstas corresponden a los tres últimos máximos interglaciales (E.I. 5e, 7, 9).

Estas discrepancias son fundamentales para el desarrollo de los estudios cronológicos de las terrazas marinas en la región, y tienen grandes implicaciones para el cálculo de velocidades de levantamiento de la costa peruana, y por ende en las interpretaciones neotectónicas.

Agradecimientos

Convenio IGP-ORSTOM (UR1E) - Contribución GEOTOP (FCAR) - Contribución al Proyecto PICG 274

Referencias

- BROGGI J. A. (1946).- *Bol. Soc. Geol. Peru*, 19, 21-33.
- EDWARDS R.E., CHEN J.H., KU T.L. & WASSERBURG G.J. (1987a).- *Science*, 236, 1547-1553.
- EDWARDS R.E., CHEN J.H. & WASSERBURG G.J. (1987b).- *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 81, 175-1902.
- GOY J., MACHARE J., ORTLIEB L. & ZAZO C. (1990).- *Bull. INQUA Neotecton. Comm.*, 13, 72-73.
- GOY J., MACHARE J., ORTLIEB L. & ZAZO C. (en prensa).- *Quatern. Intern.*, Spec. issue "Impacts of neotectonics on Quaternary coastal evolution".
- HSU J.T. (1988).- Ph.D. thesis, Cornell Univ., 310 p.
- HSU J.T. & BLOOM A.L. (1985).- *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, 17, 614.
- HSU J.T., BLOOM A. & WEHMILLER J.F. (1987).- XII INQUA Congr. (Ottawa, 1987), Abstr. v., 235.
- HSU J.T., LEONARD E.M. & WEHMILLER J.F. (1989).- *Quatern. Sci. Rev.*, 8, 255- 262.
- HSU J.T., RAMSEY K. & WEHMILLER J.F. (1990).- *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, 22 (7), A-146.
- LAHARIE R. (1970).- I Congr. Latinoameric. Geol. (Lima, 1970), VI, 145-157.
- MACHARE J. (1987).- Thèse Doct. Sc., Univ. Paris XI, 391 p.
- MACHARE J. & HUAMAN D. (1982).- Informe Inst. Geof. Perú, 19 p. (inedito).
- MACHARE J. & ORTLIEB L. (en prensa).- *Tectonophysics*, spec. vol. on Andean Geodynamics.

- MARTINSON D.G., PISIAS N.G., HAYS J.D., IMBRIE J., MOORE T.C. & SHACKLETON N.J. (1987).- *Quatern. Res.*, 27, 1-29.
- ORTLIEB L. (1987).- Thèse Sciences. *Etudes et Thèses ORSTOM*, Paris, 779+257 p.
- ORTLIEB L. (1988).- Intern. Sympos. Theoretical and applied aspects of coastal and shelf evolution, past and future, IGCP Proj. 274 (Amsterdam, 1988), Abstr. vol., 92-93.
- ORTLIEB L. & MACHARE J. (1990).- Symp. Intern. Géodynamique Andine (Grenoble, 1990), Ed. ORSTOM, Paris, 95-98.
- ORTLIEB L., GHALEB B., PICHET P. & HILLAIRES-MARCEL C. (1990).- Geol. Assoc. Canada 1990 ann. Mtg. (Vancouver), Abstr. v. 15, A99.
- ORTLIEB L. & MACHARE J. (en prensa).- *Bol. Soc. Geol. Perú*, 81 -
- SHACKLETON N.J. (1987).- *Quatern. Sci. Rev.*, 6, 183-190.
- SHACKLETON N.J. & OPDYKE N.D. (1973).- *Quatern. Res.*, 3, 39-55.
- SHACKLETON N.J. & OPDYKE N.D. (1976).- *Geol. Soc. Amer. Mem.* 145, 449-464.